

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PtCo/CoO İNCE FİLMLERİN MANYETİK**  
**ÖZELLİKLERİNİN PtCo KALINLIĞINA BAĞLI**  
**OLARAK İNCELENMESİ**

**AYŞE CANLI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2015**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PtCo/CoO İNCE FİMLERİN MANYETİK**  
**ÖZELLİKLERİNİN PtCo KALINLIĞINA**  
**BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

**AYŞE CANLI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. NUMAN AKDOĞAN**

**GEBZE**  
**2015**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**PtCo THICKNESS DEPENDENCE OF  
MAGNETIC PROPERTIES IN PtCo/CoO  
THIN FILMS**

**AYŞE CANLI**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF PHYSICS**

**THESIS SUPERVISOR**  
**ASSOC. PROF. DR. NUMAN AKDOĞAN**

**GEBZE**  
**2015**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/06/2015 tarih ve 2015/41 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşe CANLI'nın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Numan AKDOĞAN

ÜYE

: Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

**İMZA/MÜHÜR**

## ÖZET

Bu çalışmada, Si/SiO<sub>2</sub>/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt ince filmler saçtırma tekniği ile hazırlandı. PtCo tabakası 4 farklı kalınlıkta (8Å, 10Å, 12Å ve 14Å) büyütüldü ve PtCo kalınlığının yapısal ve manyetik özelliklere etkisi incelendi.

Örneklerin yapısal karakterizasyonu için X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanıldı. Manyetik özellikleri belirlemek için Ferromanyetik Rezonans (FMR) tekniği, Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE) ve Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) sistemleri kullanıldı. Ferromanyetik Rezonans (FMR) tekniği örneklerin manyetik anizotropilerini belirlemek için kullanıldı. Her dört örnekte de tek eksenli manyetik anizotropi olduğu sonucuna varıldı. Bunun sebebi de büyütmeden kaynaklanan anizotropiyle (growth induced) açıklandı. PtCo kalınlığının 12Å ve 14Å olduğu örneklerde ayrıca altı kollu anizotropi gözlemlendi. Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE) ile örneklerin mıknatıslanmasının kolay yönünü belirlemek için ölçümler yapıldı. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile sıcaklığa bağlı mıknatıslanma ölçümleri alındı. Sıcaklığa bağlı VSM ölçümlerinde kaydırma etkisinin sıcaklık düştükçe arttığı gözlemlendi. Engelleme sıcaklığının (T<sub>B</sub>) PtCo kalınlığına bağlı davranışı incelendi. FM tabakanın kalınlığı arttıkça kaydırma etkisinde artma gözlemlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE) , Kaydırma Etkisi (Exchange Bias), Manyetik Anizotropi, Ferromanyetik Rezonans (FMR), Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM), CoO, PtCo.

## SUMMARY

In this study, Si/SiO<sub>2</sub>/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt thin films were grown by using co-sputtering technique. PtCo layer was grown at four (8Å, 10Å, 12Å ve 14Å) different PtCo thicknesses and the structural and magnetic properties of the thin films were investigated.

For the structural properties of the samples, X-ray diffraction method was used. Magnetic properties have been measured by Ferromagnetic Resonance, Magneto-optical Kerr Effect (MOKE) and Vibrating Sample Magnetometer (VSM) systems. Room temperature MOKE experiments showed that all samples have magnetic easy axis in the film plane. Ferromagnetic Resonance was used to investigate the magnetic anisotropies of the samples. The origin of uniaxial in-plane magnetic anisotropy observed in all samples was attributed to growth-induced magnetic anisotropy. Six-fold magnetic anisotropy was also measured for PtCo ferromagnetic thin films with thicknesses of 12Å and 14Å. Temperature-dependent hysteresis loops were also recorded at by using VSM. From VSM measurements exchange bias effect and blocking temperature ( $T_B$ ) values were determined. It is observed that exchange bias effect and blocking temperature increase with increasing of PtCo thickness.

**Keywords: Exchange Bias, Magnetic Anisotropy, X-Ray Diffraction (XRD) Ferromagnetic Resonance (FMR), Magneto-optical Kerr Effect (MOKE), Vibrating Sample Magnetometer (VSM), CoO, PtCo.**

## TEŞEKKÜR

Lisans bitirme ve yüksek lisans tez çalışmalarım sırasında gösterdiği ilgi ve yardımlarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Numan AKDOĞAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasında incelediğim örnekleri hazırlayan Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK'e, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ERKOVAN'a ve Umut PARLAK'a teşekkür ederim.

MOKE, XRD ve FMR ölçümlerinin yapılmasında ve lisansüstü eğitim süresinde kullandığımız deneysel teknikleri öğrenmemde yardımcı olan Erdem DEMİRCİ'ye, VSM, FMR ölçümlerinde ve bu tezin yazılmasında bana yardımcı olan ve manyetizma konusunda engin bilgisiyle beni aydınlatan Mustafa ÖZTÜRK'e teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvarlarda beraber çalıştığımız ve deneylerin yapılması sırasında her zaman yanımda olan Ayşe SÖNMEZ'e teşekkür ederim.

Araştırmalarımızı yapabilmemiz için gerekli laboratuvar koşullarını sağlayan Prof. Dr. Bekir AKTAŞ'a teşekkür ederim.

212T217 ve 112T857 nolu projeler çerçevesinde yüksek lisans tez çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında yanımda olan, varlıkları ile her zaman gururlandığım AİLEM'e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. PtCo ve CoO'ın YAPISAL ve MANYETİK ÖZELLİKLERİ	4
2.1. PtCo'in Yapısal ve Manyetik Özellikleri	4
2.2. CoO'in Yapısal ve Manyetik Özellikleri	6
3. MANYETİK ANİZOTROPI	7
4. KAYDIRMA ETKİSİ	10
4.1. İdeal Kaydırma Etkisi Modeli	12
4.2. Zorlayıcı Alanlar	13
4.3. Kaydırma Etkisinin Sıcaklık ile Değişimi	14
4.4. Kaydırma Etkisinin FM ve AF Tabakanın Kalınlıklarına Bağlı Davranışı	15
5. DENEYSEL METODLAR	17
5.1. X-ışını Kırınımı (XRD)	17
5.2. Ferromanyetik Rezonans	19
5.3. Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE)	20
5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)	24
6. DENEYSEL SONUÇLAR	26
6.1. Örneklerin hazırlanması	26
6.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri	27
6.3. Ferromanyetik Rezonans (FMR) Ölçümleri	28
6.4. Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE) Ölçümleri	32
6.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçümleri	33



6.5.1. Kaydırma Etkisi Ölçümleri	34
7. SONUÇLAR	38
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	44
EKLER	45

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

## Simgeler ve

## Açıklamalar

### Kısaltmalar

$\Theta_{\text{hex}}$	: Miknatıslanma ve hekzagonal c-ekseni arasındaki açı
$\alpha_1, \alpha_2$ ve $\alpha_3$	: Kristal yönelim açıları
$\mu$	: Vakum ortamının manyetik geçirgenliği
$\theta_T$	: Doyum miknatıslanması ile yüzeyin normalinin yaptığı
$\Theta$	: Gelme ve yansıma açıları
$\gamma$	: Gyromanyetik oran
$\alpha$	: Sönüm parametresi
$h$	: Planck sabiti
$\nu$	: Işınım frekansı
$\lambda$	: Işığın dalga boyu
$\Phi_H$	: Manyetik akı
$\epsilon$	: Elektromanyetik kuvvet
$\mu$	: Vakum ortamının manyetik geçirgenliği
$\theta_T$	: Doyum miknatıslanması ile yüzeyin normalinin yaptığı açı
$J_{EB}$	: Birim alan başına düşen ara yüzey değiş-tokuş enerjisi
$T_B$	: Engelleme sıcaklığı (Blocking temperature)
$T_N$	: Néel sıcaklığı
$t_{FM}$	: Ferromanyetik filmin kalınlığı
$B_{\text{demag}}$	: Demanyetizasyon alanı
$E_{\text{cub}}$	: Kübik sistemlerde manyeto kristal anizotropi enerjisi
$E_{\text{demag}}$	: Demanyetizasyon enerjisi
$E_{\text{hex}}$	: Manyeto kristal enerji bağıntısı
$F$	: Serbest enerji
$H_C$	: Zorlayıcı alan
$H_{EB}$	: Kaydırma etkisi alanı
$H_{FC}$	: Soğutma esnasında uygulanan manyetik alan
$K_1, K_2$	: Anizotropi sabitleri
$K_{\text{etkin}}$	: Etkin manyetik anizotropi

$K_S$	:	Yüzey anizotropisi
$K_U$	:	Tek yönlü anizotropi
$K_V$	:	Hacim anizotropisi
$M_S$	:	Doyum mıknatıslanması
AFM	:	Antiferromanyetik
ESR	:	Elektron spin rezonans
fcc	:	Yüzey merkezli kübik yapı
fct	:	Yüzey merkezli tetragonal yapı
hcp	:	Hekzagonal sıkı paket
MOKE	:	Manyeto-optik Kerr etkisi
MCA	:	Manyetik kristal anizotropi
NM	:	Manyetik olmayan
MOKE	:	Manyeto-optik Kerr etkisi
MCA	:	Manyeto-kristal Anizotropi
VSM	:	Titreşimli örnek manyetometresi
XRD	:	X-ışınımı kırınımı

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: GMR yapısında FM tabakaların mıknatıslanma yönünün a) paralel, b) antiparalel olduğu durumlarda direnç değerinin davranışı.	2
2.1: Kobalt hekzagonal sıkı paket (hcp) yapısı.	4
2.2: Pt ve Co elementlerinin periyodik cetveldeki yeri.	5
2.3: CoPt için faz diyagramı.	6
3.1: Histeresis eğrisinde kolay ve zor eksenler.	7
3.2: Spin-örgü-yörünge etkileşmesi.	8
4.1: FM ve AF malzemelerin Néel sıcaklığının üstünde ve altındaki spin davranışları.	10
4.2: Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (1) 77K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (2) ise 77K'e kadar 10kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.	11
4.3: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.	12
4.4: Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alanlar.	13
4.5: Zorlayıcı alanların birbirinden ayrılmaya başladığı engelleme sıcaklığı ( $T_B$ ).	15
4.6: FM malzemenin kalınlığı ile KE arasındaki ilişkinin gösterimi.	15
5.1: X-ışınının atomlardan oluşmuş tabakalardan kırınımı gösterilmektedir.	18
5.2: Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarlarında laboratuvarlarında bulunan XRD cihazı.	18
5.3: a) Faraday etkisi, b) Kerr etkisi sistematiği.	21
5.4: MOKE düzeneği.	22
5.5: MOKE düzeneğinde a) enine, b) boyuna, c) dik Kerr etkileri.	23
5.6: GTU Fizik Laboratuvarı MOKE sistemi.	23
5.7: GTÜ Fizik Bölümü VSM laboratuvarı.	25
6.1: Tez çalışmasında hazırlanan örnek sistemleri a)PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å).	26
6.2: Üzerine film büyütülmemiş Si(111) alttaşın XRD grafiği.	27
6.3: Si/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt örnekleri için XRD grafikleri gösterilmiştir.	28

6.4:	Örnek yüzeyine a) dik, b) paralel FMR ölçümleri için kullanılan geometriler.	29
6.5:	Oda sıcaklığında örnek düzlemine dik geometride 4 örneğin rezonans alanlarının $\theta$ açısına bağlı değişimi.	29
6.6:	Oda sıcaklığında örnek düzleminde ölçülen a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c)PtCo(12Å), d)PtCo(14Å) örneklerin FMR spektrumları.	30
6.7:	Oda sıcaklığında örnek düzlemi geometride a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å)'luk örnekler için rezonans alanlarının açığa bağlı değişimleri.	31
6.8:	Oda sıcaklığında örnek düzlemi geometride a) PtCo(12Å), b) PtCo(14Å)'luk örnekler için rezonans alanlarının açığa bağlı değişimleri.	31
6.9:	Örnek düzlemine a)paralel, b) örnek düzlemine dik uygulanan manyetik alanlar gösterilmiştir.	32
6.10:	Örneklerin oda sıcaklığında L-MOKE ile örnek düzlemine a) paralel b) dik ölçülen histeresis eğrileri.	33
6.11:	Örneklerin 300K'de örnek düzlemine paralel ve dik ölçülen a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) histeresis eğrileri	34
6.12:	a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) örneklerin 100K ve 300K'de ölçülen histeresis eğrileri.	35
6.13:	Zorlayıcı alanlar ve sıcaklık ilişkisi: Engelleme sıcaklığının a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) örnekleri için belirlenmesi.	37
6.14:	a) Kaydırma etkisinin, b) zorlayıcı alanın sıcaklığa ve PtCo kalınlığına bağlı davranışı.	37

# TABLÖLAR DİZİNİ

## **Tablo No:**

## **Sayfa**

6.1: Zorlayıcı ( $H_{C1}, H_{C2}, H_C$ ) ve kaydırma etkisi ( $H_{EB}$ ) alan değerleri.

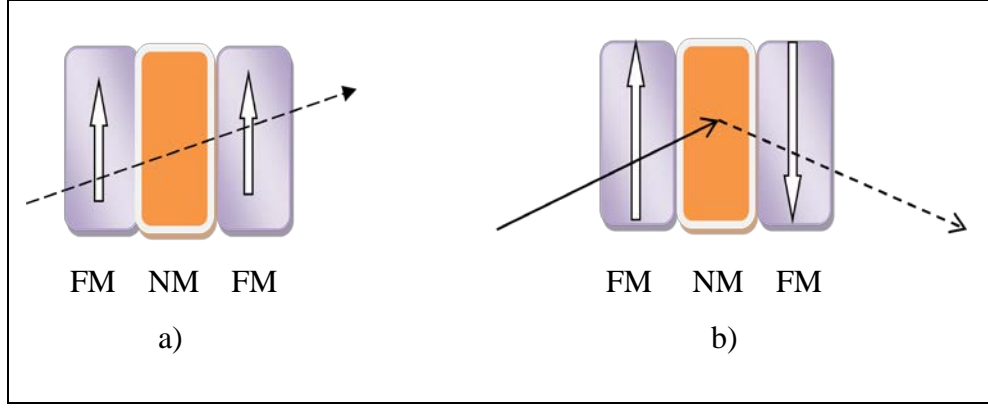
35

# 1. GİRİŞ

Manyetik çok katlı ince filmlerin ara yüzelerindeki etkileşimleri ile yapılan çalışmalar teknolojik uygulama alanları için dikkat çekmiş ve yakın tarihlerde Dev Manyeto Direnç (GMR) ve Tünelleme Manyeto Direnç (TMR) etkisi gibi araştırmalarla harddisk ve MRAM uygulamalarında yer almıştır [1]-[7].

GMR'ın keşfi manyetodirenç (MR) üzerine yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır. MR, uygulanan manyetik alan altında iletkenin direncinin değişimi sonucu ortaya çıkan bir etkidir. 1988 yılında yapılan çalışmalarda iki ferromanyetik (FM) tabaka arasına manyetik olmayan bir tabaka büyütülerek incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda fizik biliminde spintronik adı verilen yeni bir kapı aralanmış ve öneminden dolayı bu alandaki ilk çalışma sahiplerine 2007 yılında Nobel Ödülü verilmiştir. Bu alanda Nobel ödülü alan bilim adamlarından Peter Grünberg Fe/Cr/Fe üç katlı ince film ve Albert Fert ise (Fe/Cr)<sub>40</sub> çok katlı ince filmler üzerine çalışmalar yaparken GMR etkisini keşfetmişlerdir [2]- [3].

GMR sistemleri elektronların spin özelliğine bağlı direncin değişimini esas alır ve bu etki genel olarak iki FM katman arasına bir manyetik olmayan (NM) katman büyütülerek oluşturulmaktadır. Spin vanalarının temelini oluşturan GMR etkisinde, büyütülen FM katmanlardan bir tanesinin spinleri sabitlenir ve diğer FM malzemenin spinleri uygulanan dış manyetik alan ile döndürülerek FM yapılar paralel veya antiparalel duruma getirilir. Böylelikle sistemin direncinde değişiklik yapılmış olur. Şekil 1.1'de FM tabakaların paralel ve antiparalel durumları gösterilmektedir. Şekil 1.1 (a)'da paralel durumda sistemin direnci az, şekil 1.1 (b)'de antiparalel durumda ise sistemin direnci fazladır. Bilgisayar dilinde bu durum 1-0 ikili kombinasyonları olarak adlandırılır ve bilgi depolama ve okumada kullanılır.



Şekil 1.1: GMR yapısında FM tabakaların mıknatıslanma yönünün a) paralel, b) antiparalel olduğu durumlarda direnç değerinin davranışı.

Uygulanan dış manyetik alan ile düzenli spin yapısına sahip FM malzemelerin spinlerini sabitlemek için antiferromanyetik (AF) malzeme kullanılmaktadır. AF malzemenin spinleri Néel sıcaklığının altında düzenli hale gelip FM malzemenin spinleri ile etkileşime geçer. Bu etkileşim, ilk olarak Meiklejohn ve Bean tarafından 1956 yılında ferromanyetik Co parçacıkları ile yaptıkları çalışmada Co parçacıklarının bir kısmının oksitlenmesi (CoO) sonucunda Co'nun histeresis eğrisinde görülen kayma olarak ifade edilmiştir [8]-[9]. Bu kayma, kaydırma etkisi (exchange bias) ya da tek yönlü (unidirectional) anizotropi olarak adlandırılır.

Bu tezde Si alttaş üzerine büyütülmüş PtCo/CoO ince filmlerin kaydırma etkisi özellikleri incelendi. Literatürde PtCo/CoO ince filmi ile ilgili birçok kaydırma etkisi çalışması mevcuttur [1], [10]-[11]. 2013 yılının Ocak ayında yapılan bir çalışmada  $[\text{CoO}(3.5\text{nm})/\text{CoPt}(2.3\text{nm})]_{10}$  çok katlı ince filmi incelenmiş ve dik manyetik anizotropi ile dik kaydırma etkisi gözlemlenmiştir [10]. 2013 yılının Mayıs ayında yapılan başka bir çalışmada,  $\text{CoO}(15\text{nm})/[\text{CoPt}(3\text{nm})/\text{CoO}(4\text{nm})]_8$  ince filminde tekrar dik KE gözlemlenmiştir [11].

Bu tez çalışmasında magnetron saçtırmalı kaplama yöntemiyle Si(111) alttaş üzerine büyütülen Pt/[PtCo]<sub>t</sub>/Pt/CoO/Pt ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri incelendi. Farklı PtCo kalınlıklarına (8 Å, 10 Å, 12 Å ve 14 Å) sahip PtCo/CoO ince filmleri için KE ölçümleri yapıldı.

Bu tez yedi bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tezin önemi ve amacı anlatılmıştır. İkinci bölümde tezde kullanılan ince filmlerin genel özelliklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ince filmlerin manyetik anizotropisinden ve anizotropi çeşitlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde kaydırma etkisi genel



zellikleriyle anlatılmıştır. Beřinci bölümde örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerini anlamaya yönelik kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. Altıncı bölümde örneklerin yapısal ve manyetik özelliklerinin deneysel sonuçları anlatılmıştır. Son bölümde ise tezin sonuçları verilmiştir.

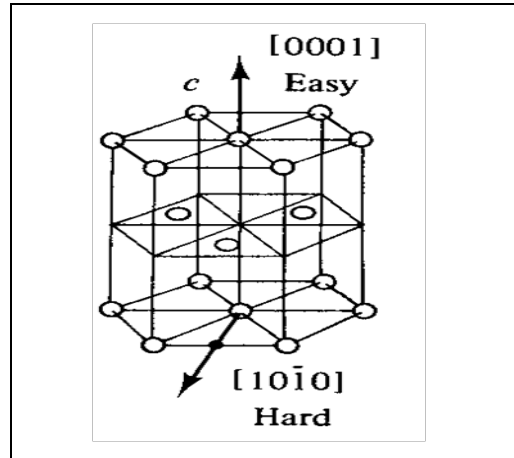
## 2. PtCo ve CoO'ın YAPISAL ve MANYETİK ÖZELLİKLERİ

Gelişen çağımızda, bilgi depolama sistemlerinde küçük boyutlardaki cihazlara daha fazla bilgi depolamak ve az enerji harcayarak, daha hızlı işlem yaptırmak öncelikli hedeflerdendir. Yüksek manyetokristal anizotropiye sahip oldukları için, FePt, CoPt, CoFeB, PdFe ve CoCrPt gibi alaşımlar bilgi depolama sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır [12]-[18].

Bu bölümde CoPt ve CoO ince filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri anlatılmıştır.

### 2.1 PtCo'ın Yapısal ve Manyetik Özellikleri

Kobalt elementi, demir ve nikel gibi FM olan, atom numarası 27, atom ağırlığı 58.9g/mol ve yarıçapı 0,125 nm olan bir elementtir [19]. Kobalt, farklı sıcaklık ve kullanılan alttaşa bağlı olarak farklı kristal fazlara sahiptir ve 425°C'nin altında altıgen sıkı paket (hexagonal closed packed-hcp) yapıdadır [20]. Şekil 2.1'de hcp Co için mıknatıslanma yöneliminin [0001] kolay ve [10 $\bar{1}$ 0] zor eksenleri görülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise yüzey merkezli kübik (face centered cubic-fcc) yapıdadır [21]-[22].



Şekil 2.1: Kobalt hekzagonal sıkı paket (hcp) yapısı.

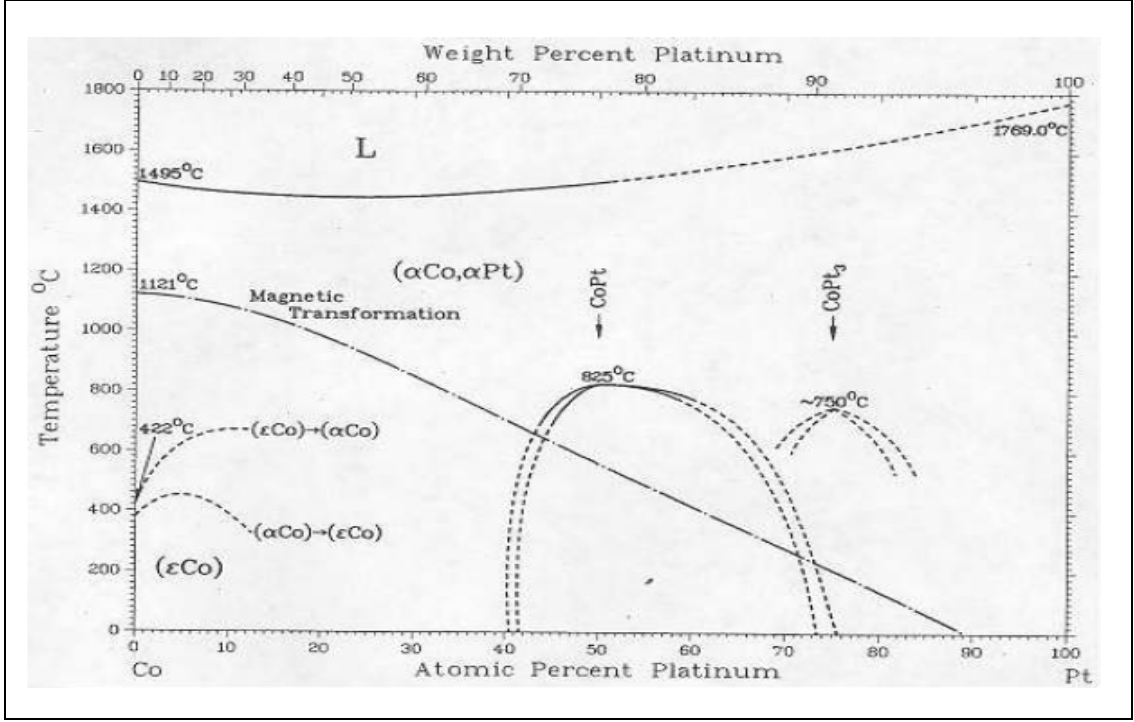
Şekil 2.2'de gösterilen elementler içerisinde platin elementi paramanyetik bir malzeme olup, yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdadır [23].

ferromagnetic			antiferromagnetic			paramagnetic			diamagnetic									
1											2							
H											He							
3	4							5	6	7	8	9	10					
Li	Be							B	C	N	O	F	Ne					
11	12							13	14	15	16	17	18					
Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl	Ar					
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Ac	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

Şekil 2.2: Pt ve Co elementlerinin periyodik cetveldeki yeri.

PtCo alaşımlarında Co 3d ve Pt 5d orbitalleri arasında hibritleşme meydana gelmektedir ve bu hibritleşme kimyasal birleşme oranına bağlıdır. Co ve Pt arasındaki hibritleşme Pt elementinin manyetik moment kazanmasına sebebiyet verirken, Co elementinin spin manyetik momentinde azalma olur [25]-[27]. Bu etkileşme sayesinde Pt atomları, Co atomlarıyla oluşturdukları alaşımlarda ferromanyetik özellik kazanırlar [26], [29]. Yapılan PtCo çalışmalarında Pt atomlarının varlığının ferromanyetik Co'nun toplam mıknatıslanmasını arttırdığı ve dik mıknatıslanmaya katkısının olduğu gözlenmiştir [10]-[18]. Dik mıknatıslanma, mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik olma isteğidir. Dik mıknatıslanma daha küçük alana daha fazla bilgi kaydetme imkânı sağladığından günümüzde ince filmin bu özelliği bilgi depolama sistemlerinde kullanılmaktadır.

PtCo alaşımları oluşturulurken Co ve Pt karşılıklı olarak her oranda karıştırılabilirler ve tüm oranlarda homojen bileşik oluşturabilirler [13]-[15], [25], [29]. Şekil 2.3'te CoPt alaşımları için faz diyagramı verilmiştir. Eşit miktarlarda Pt ve Co bir aaya gelerek oluşturulan PtCo alaşımı yüksek sıcaklıklardan 835°C'nin altına soğutulduğunda faz değişimi gerçekleşmektedir. Böylece yapısı bozulmuş yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdan düzenli yüzey merkezli tetragonal (fct) yapıya geçmektedir. PtCo için 825°C ve altında kararlı durum gözlemlenmektedir.



Şekil 2.3: CoPt için faz diyagramı.

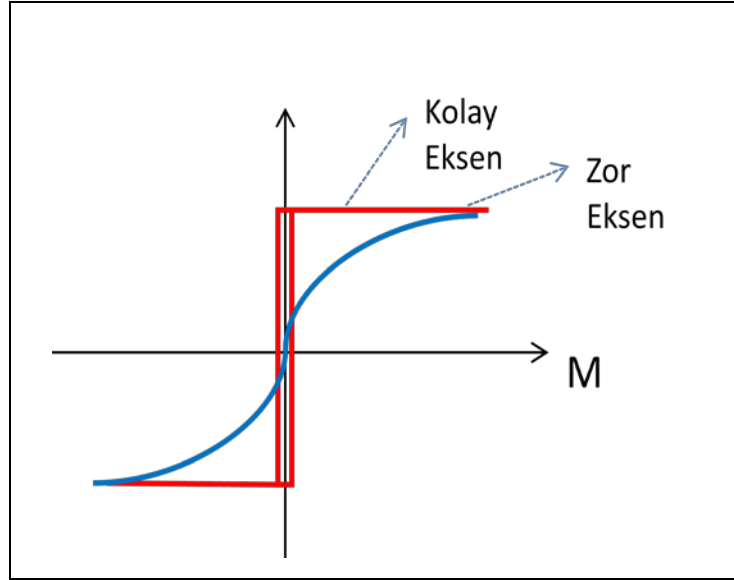
## 2.2 CoO'in Yapısal ve Manyetik Özellikleri

Kobalt oksit, günümüzde elektronik, manyetik, kataliz, sensör alanlarında ve biyomedikal uygulamalarda ilgi çeken oksit bileşiklerdendir [30]. CoO oda sıcaklığında kübik yapıdadır ve paramanyetik özellik göstermektedir. 291K'in altında ise kristal deformasyon ile tetragonal yapıya ve antiferromanyetik özelliğe sahip olur. Sıcaklık azaldıkça tetragonal yapı ve antiferromanyetik özellik daha da baskın hale gelir [30]-[33].

Bu tez çalışmasında kaydırma etkisini inceleyebilmek için CoO kullanıldı. CoO'in seçilme sebebi manyetik ölçümlerde kolaylık sağlayan oda sıcaklığına yakın Neél sıcaklığına ( $T_N = 291K$ ) sahip olmasıdır [34].

### 3. MANYETİK ANİZOTROPİ

Anizotropi kavram olarak yöne bağımlılığı ifade etmektedir. Manyetik anizotropi ise manyetik özelliklerin belirlenmesi için yapılan ölçümlerde malzemenin mıknatıslanmasının yöne bağımlılığını ifade etmektedir. FM malzemeler mıknatıslandığında histeresis eğrisi manyetik alanın uygulandığı yöne göre değişim göstermektedir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, mıknatıslanma kolay ekseninde daha küçük manyetik alanla doyuma giderken, zor ekseninde doyuma ulaşmak için daha büyük manyetik alana ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.1: Histeresis eğrisinde kolay ve zor eksenler.

İnce filmler manyetik anizotropiye sahip olmaları ve bu sebeple teknolojik cihazlara uyarlanabilmesi nedeniyle bilim adamlarının ilgisini çekmiş ve bu sistemlerin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır [35]. Günümüzde manyeto-optik kayıt cihazlarında, bilgi depolama sistemlerinde ve birçok spintronik cihazlarda ince filmlerin farklı anizotropi özelliklerinden yararlanılmıştır.

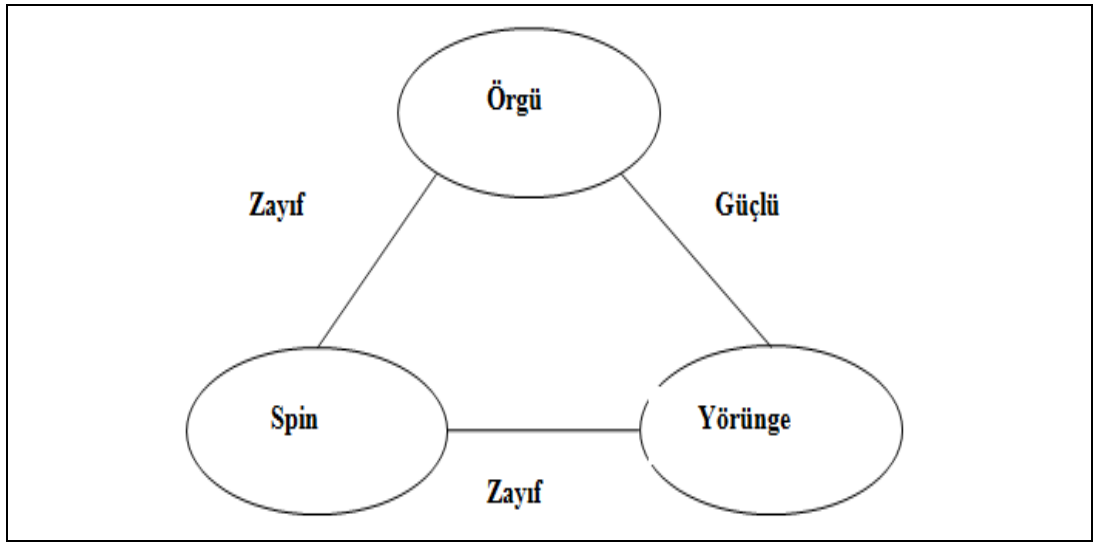
Manyetik anizotropi, malzemenin şekli, kristal simetrisi, malzemedeki stres ya da komşu atomların etkileşmesi gibi birçok farklı etkiden kaynaklanmaktadır.

Manyetik anizotropinin örnek düzleminde ya da örnek düzlemine dik olması etkin manyetik anizotropinin işareti ile belirlenmektedir [28], [36].

$$K_{\text{etkin}} = K_v + 2K_s / t_{\text{FM}} \quad (3.1)$$

$$K_v = K_c + K_d + K_\gamma = K_c + 2\pi M_s^2 - 3/2 \gamma \quad (3.2)$$

$K_{\text{etkin}}$  birim hacimdeki manyetik anizotropi,  $K_v$  hacim anizotropisi,  $K_s$  arayüzeydeki anizotropi ve  $t_{\text{FM}}$  filmin kalınlığı olarak tanımlanır.  $K_v$  kendi içerisinde denklem (3.2)'de belirtildiği gibi  $K_c$  kristal anizotropi,  $K_d$  şekil anizotropi ve  $K_\gamma$  manyetoelastik anizotropi ile ifade edilmektedir [37]. FM filmler çok aşırı ince büyütüldüklerinde arayüzey etkileri sebebiyle FM malzemenin mıknatıslanmasının kolay eksenini örnek düzlemine dik hale getirir. Bu durum denklem (3.1)'deki ikinci terimin baskın hale gelmesi ve  $K_{\text{etkin}}$  üzerinde belirleyici olmasının bir sonucudur. Şekil 3.2'de spin-örgü, örgü-yörünge ve spin-yörünge etkileşmeleri gösterilmiştir [21]. Bu etkileşmelerin kristal anizotropiye katkıları farklıdır. Zayıf bir etkileşme olmasına rağmen manyetik anizotropiye katkı sağlayan önemli etkileşme spin-yörünge etkileşmesidir. Yörünge-örgü etkileşmesi ile elektronların orbitalleri belirli kristal eksenleri boyunca yönelmeyi tercih ederler ve spin-yörünge etkileşmesi ise bunu spinlere aktarır.



Şekil 3.2: Spin-örgü-yörünge etkileşmeleri.

Spin- orbit etkileşmesi ile ifade edilen anizotropi kristal anizotropi olarak ifade edilir ve eğer başka bir anizotropi çeşidi yok ise kristal anizotropi, mıknatıslanmayı

kristal yapısına göre yönlendirir [33]. Örneğin hegzagonal yapı için manyetokristal enerji bağıntısının en büyük ilk iki terimi;

$$E_{uni} = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad (3.3)$$

ile ifade edilir.  $\theta$  mıknatıslanma ve hegzagonal c-ekseni arasındaki açıdır.  $K_1$  ve  $K_2$  anizotropi sabitleridir. Son iki terimler ihmal edilse ve sistemde başka anizotropi yoksa mıknatıslanmanın kolay yönü c-ekseni boyuncadır. Hegzagonal veya tetragonal yapılarda görülen bu duruma tek eksenli anizotropi denilmektedir.

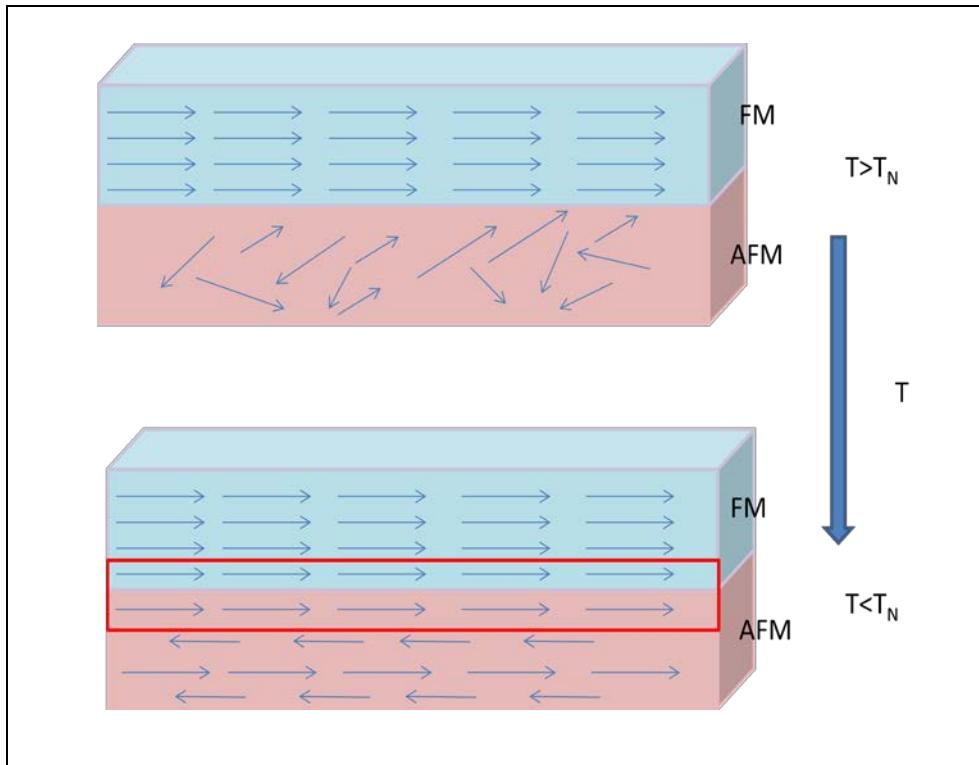
Kübik sistemler için manyeto kristal anizotropi denklem (3.3)'teki gibi ifade edilir.

$$E_{cub} = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \quad (3.4)$$

Burada  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\alpha_3$  yön kosinüsleri olarak adlandırılır.

## 4. KAYDIRMA ETKİSİ

FM/AF sistemler, dış manyetik alan uygulanarak AF malzemelerin Néel sıcaklığının üstüne ısıtılıp alan altına soğutulduğunda, FM ve AF malzemeler arasında şekil 4.1’de belirtildiği gibi arayüzeyde değiş-tokuş etkileşimi meydana gelmektedir. Bu etkileşim sonucunda histeresis eğrisinde uygulanan alanın tersi yönünde kayma gerçekleşir. Histeresis eğrisindeki bu kayma kaydırma etkisi olarak tanımlanmaktadır.

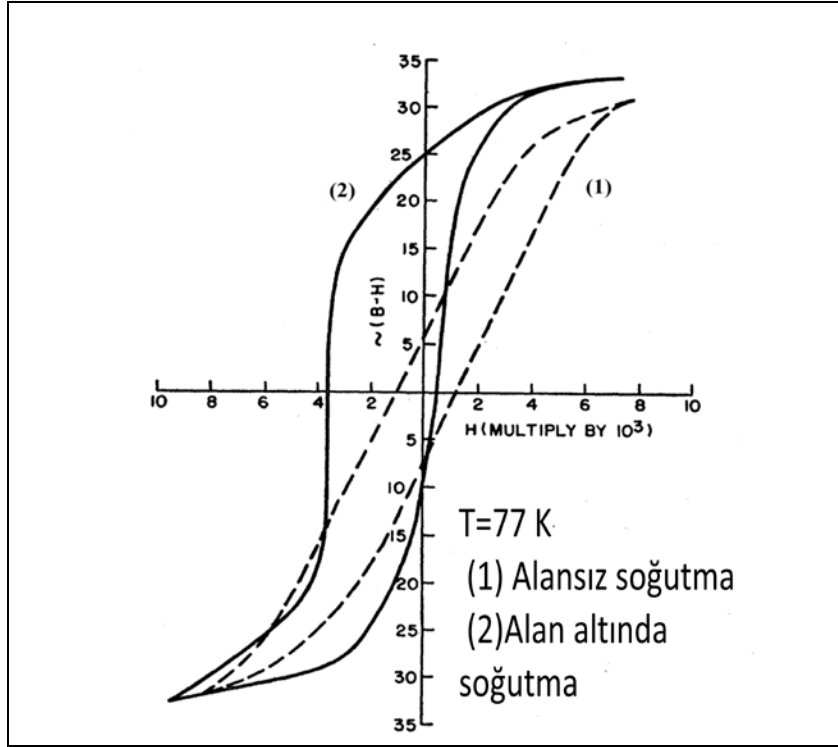


Şekil 4.1: FM ve AF malzemelerin Néel sıcaklığının üstünde ve altındaki spin davranışları.

Tek yönlü anizotropi olarak da bilinen kaydırma (EB) etkisi, 1956 yılında Meiklejohn ve Bean tarafından keşfedilmiştir [7]-[8]. Şekil 4.2’de Meiklejohn ve Bean’in çalışmalarında elde ettikleri histeresis eğrisindeki kayma gösterilmektedir. Şekilde kesikli çizgilerle (1) gösterilen histeresis eğrisi dış manyetik alan uygulanmadan 77 K’e kadar soğutulma sonucu elde edilmiş, düz çizgilerle (2) belirtilen eğri ise 10kOe dış manyetik alan altında soğutulma sonucu elde edilmiştir. Soğutma esnasında alan uygulanmadığında histeresis eğrisinde bir kayma Kaydırma



etkisi, manyetik sensörlerde, sabit disklerin okuyucu kafalarında ve manyetik RAM'lerde kullanılmasından dolayı önemini korumaktadır. Uzun yıllar önce keşfedilmiş olmasına ve teknolojik uygulamalarda kullanılmasına rağmen kaydırma etkisi henüz teorik olarak tam anlamıyla anlaşılmamıştır. Bu nedenle hem etkiyi daha iyi anlamaya ve hem de kullanım alanını arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir [8]-[10].



Şekil 4.2: Kesik çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (1) 77K'e kadar manyetik alansız soğutulmuş ölçümü, düz çizgilerle gösterilen histeresis eğrisi (2) ise 77K'e kadar 10kOe manyetik alan altında soğutulmuş ölçümü göstermektedir.

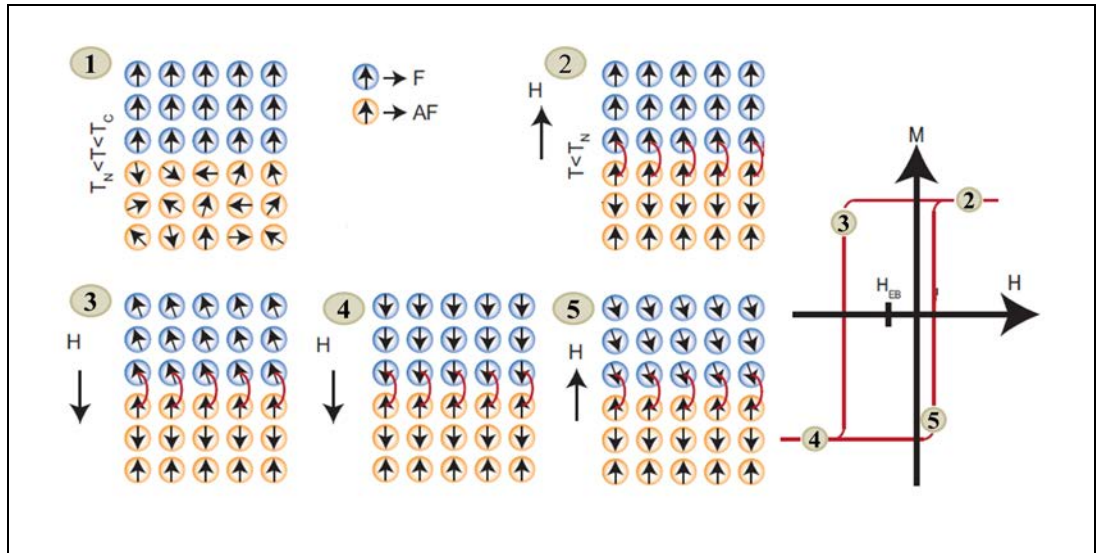
Geçtiğimiz çeyrek asırda, kaydırma etkisi ile ilgili FM/AFM sistemlerde çoğunlukla mıknatıslanmanın örnek düzleminde olduğu çalışmalar yapılmıştır. FeMn/NiFe, CoO/Co ve IrMn/CoFe çok katlı sistemleri bunlara örnek olarak verilebilir [35]-[38],[52]-[56].

## 4.1. İdeal Kaydırma Etkisi Modeli

KE için bir kaç teorik model mevcuttur [39]-[40]. Bu tezde, ideal kaydırma etkisi modeline ait denklem 4.1'den yararlanılmıştır.

$$H_{EB} = -\frac{J_{EB}}{\mu_0 M_F t_F} \quad (4.1)$$

Bu denklemde  $t_{FM}$  ferromanyetik malzemenin kalınlığı,  $M_F$  ferromanyetik malzemenin mıknatıslanması,  $J_{EB}$  ise birim alan başına düşen ara yüzey değiş-tokuş enerjisidir. Bu denklem ideal bir durum için mıknatıslanma eğrisinin beklenen davranışını verir.



Şekil 4.3: Kaydırma etkisi mekanizmasının manyetik alana bağlı gösterimi.

Şekil 4.3'te bir AF malzeme ile etkileşim halinde bulunan bir FM tabakanın uygulanan dış manyetik alan altında soğutulması sonucunda mıknatıslanmasının durumları incelenmiştir [56].

- Adım 1

Bu durumda, FM malzemenin manyetik momentlerini düzene sokmak için sisteme manyetik alan uygulanarak soğutulmaya başlanılır. Bu esnada AF malzeme  $T_N$  sıcaklığının altına inmediğinden dolayı paramanyetik fazdadır.

- Adım 2

Uygulanan manyetik alan ile soğutulma esnasında  $T_N$  sıcaklığının altına inildiğinde, AFM malzemenin manyetik momentleri FM malzeme ile etkileşmeye geçecek ve düzenli spin yapısına sahip olacaktır.

- Adım 3

Antiferromanyetik malzemenin manyetik momentleri ferromanyetik malzemenin manyetik momentleri ile arayüzeyde sabitleyici (pinning) bir etki oluşturmaktadır ve FM malzemenin manyetik momentleri uygulanan dış manyetik alan yönüne dönmek isteyecekler fakat ferromanyetik ve antiferromanyetik tabaka arasında değiş-tokuş etkileşmesinden dolayı zorlanacaktır.

- Adım 4

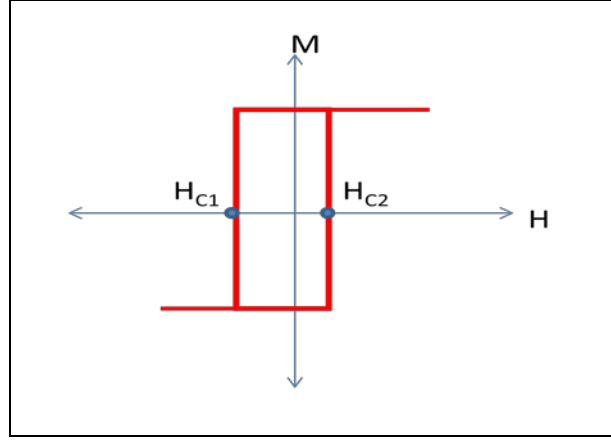
Ancak yeterli alan uygulandığında FM malzemenin soğutma alanının tersi yönünde doyuma ulaşır ve tüm manyetik momentler uygulanan alan yönünde yönelirler.

- Adım 5

Soğutma alanı yönünde manyetik alan uygulandığında AFM malzemenin manyetik momentleri ile değiş-tokuş etkileşimi sayesinde daha az bir enerji ile FM malzemenin manyetik momentleri tekrar ilk alan yönünde yönelecektir.

## **4.2. Zorlayıcı Alanlar**

Histeresis eğrisinde mıknatıslanmanın sıfır olduğu değerler zorlayıcı alanlar (coercive fields) olarak adlandırılır.



Şekil 4.4: Histeresis eğrisindeki zorlayıcı alanlar.

Şekil.4.4’de gösterildiği gibi mıknatıslanma sıfır olduğunda uygulanan alanın negatif olduğu değer  $H_{C1}$ , uygulanan alanın pozitif olduğu değer  $H_{C2}$  olarak adlandırılır. Bu değerler ile kaydırma etkisi alanı ( $H_{EB}$ ) ve zorlayıcı alan ( $H_C$ ) hesaplanır. Buna göre her iki zorlayıcı alan kullanılarak ortalama zorlayıcı alan ( $H_C$ );

$$H_C = \frac{|-H_{C1} + H_{C2}|}{2} \quad (4.2)$$

formülü ile, kaydırma etkisi ( $H_{EB}$ ) alanı;

$$H_{EB} = \frac{H_{C1} + H_{C2}}{2} \quad (4.3)$$

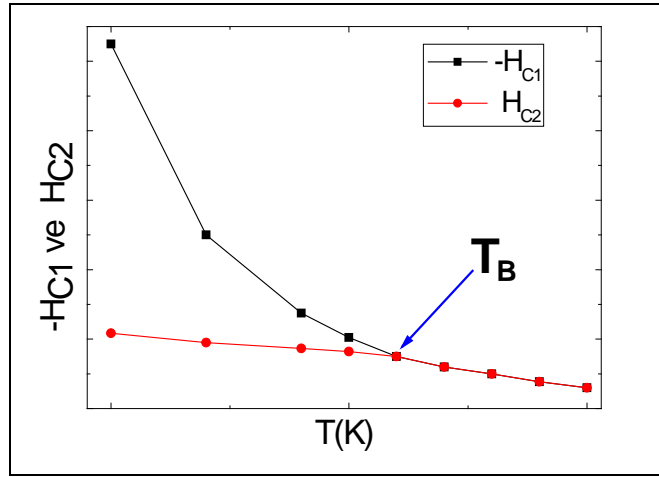
formülü ile hesaplanır.

### 4.3. Kaydırma Etkisinin Sıcaklık ile Değişimi

Kaydırma etkisi, önceki bölümlerde FM ve AF malzemelerin arayüzeyde etkileşmesi ve alan altında soğutulması ile histeresis eğrisinde meydana gelen kayma olarak ifade edilmişti. Kaydırma etkisini iki temel faktör etkiler; birinci etken sıcaklık, ikincisi ise malzemelerin tabaka kalınlıklarıdır. Sıcaklığın etkisini bu bölümde inceleyeceğiz. FM malzemeler Curie sıcaklığının üstünde paramanyetik özellik gösterir. FM malzemenin spinlerinin birbirlerine paralel olması için sıcaklığın Curie sıcaklığının altında olması gerekmektedir. AFM bir malzeme ise Néel

sıcaklığının üstünde paramanyetik özellik göstermektedir. Kaydırma etkisinin gözlemlenmesi için AFM malzemenin spinlerinin anti paralel olması yani sıcaklığın Néel sıcaklığının altında olması gerekmektedir.

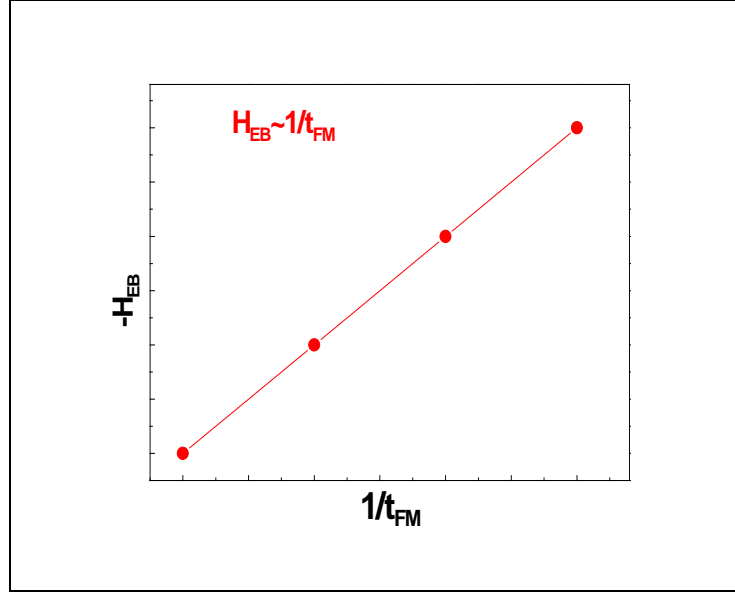
Her AFM malzemenin kendine özgü Néel sıcaklığı bulunmaktadır. Normalde KE'nin Néel sıcaklığının hemen altında görülmesi gerekir ancak bazı malzemelerde kalınlık ve yapıda farklı fazların olması gibi nedenlerle Néel sıcaklığının altında KE gözlenir. Néel sıcaklığının altında kaydırma etkisinin gözlenmeye başladığı ilk sıcaklık engelleme (blocking) sıcaklığı olarak bilinir [39]-[41].



Şekil 4.5: Zorlayıcı alanların birbirinden ayrılmaya başladığı engelleme sıcaklığı (T<sub>B</sub>).

#### 4.4. Kaydırma Etkisinin FM ve AF Tabakaların Kalınlıklarına Bağlı Davranışı

Kaydırma etkisini etkileyen faktörlerden ikincisi FM ve AFM malzemenin kalınlıklarıdır. Yapılan çalışmalarda KE ile FM tabaka kalınlığı arasında şekil 4.6'da gösterildiği gibi ters orantı olduğu ve KE ile AFM tabaka kalınlığı arasında doğru orantı olduğu gösterilmiştir [39]-[41].



Şekil 4.6: FM malzemenin kalınlığı ile KE arasındaki ilişkinin gösterimi.

Denklem 4.2’de göre KE ile FM tabaka kalınlıkları ters orantılı iken, bazı çalışmalarda belli kalınlık değerinin altında KE ile FM tabakanın kalınlığının doğru orantılı olduğu görülmüştür [41].

$$H_{EB} = 1/t_{FM} \quad (4.4)$$

Bu tez çalışmasında da FM tabakanın kalınlığı arttıkça KE’nin arttığı gözlemlenmiştir. Detaylı sonuçlar tezin deneysel kısmında verilmiştir.

## 5. DENEYSEL METOTLAR

### 5.1 X-ışını Kırınımı (XRD)

Bu kısımda ince filmin yapısal özelliklerini incelemekte kullanılan X-ışını kırınımından (XRD) bahsedilecektir.

X-ışını kırınımı tekniği, örmekten yansıyan x-ışınlarının ölçülmesiyle örneklerde kristal yapının, kristal yönlerinin ve kristal kusurlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir.

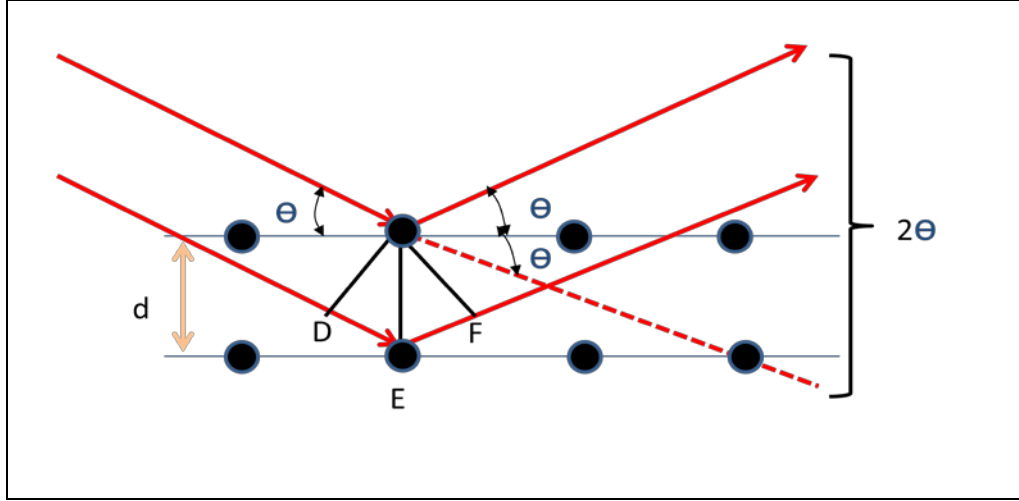
Diğer yapı analizlerine göre avantajı örneğin zarar görmemesi ve atmosfer ortamında ölçüm yapılabilmesidir.

X-ışını, kısa dalgaboylu elektromanyetik ışımadır. 1895 yılında Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Keşfedildiğinde mahiyeti tam açıklanamadığı için X ışını olarak adlandırılmıştır. 1901 yılında Röntgen'e X-ışınları keşfinden dolayı Nobel Fizik Ödülü verilmiştir [42].

1912'de Max Von Laue, X-ışınlarının kristalden kırınımının mümkün olacağını öne sürmüş ve bu teorisinin ispatlanmasıyla 1914'te Nobel Ödülü almıştır [42]. X-ışını kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok ince tabakaların kristal analizinin yapılmasını sağlar.

İngiliz fizikçi Bragg ve oğlu, kristal düzlemlerinden gelen X-ışınlarının yansıyan X-ışınları ile bağlantılı olabileceğini düşündüler ve bu düşünce ile yaptıkları çalışmalarla bu önermeyi açıklayan bir bağıntı geliştirdiler. 1915 yılında Nobel Ödülü aldıkları bu bağıntıya "Bragg Yasası" denildi [43].

Bragg'lar kristallerin paralel atom düzlemlerinden oluştuğunu göz önüne alarak gelen her bir elektromanyetik dalganın geldikleri düzlemden yansımaya uğradığını ifade etmişlerdir. Gelen ve giden dalganın açıları elastik çarpışmadan dolayı eşittir. Şekil 5.2'deki Braggların açıkladıkları kırınım olayı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.1: X-ışınının atomlardan oluşmuş tabakalardan kırınımı gösterilmektedir.

Burada,  $\theta$  gelme ve yansıma açılarıdır ve toplam kırınım açısı  $2\theta$  olarak açıklanır. Kırınım olayı denklem (5.1)'deki formül ile ifade edilir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.1)$$

Burada  $d$  tabakalar arası mesafeyi,  $\lambda$  dalga boyunu vermektedir. Denklem 5.1 kullanılarak düzlemler arasındaki mesafe ( $d_{hkl}$ ) bulunur ve kristal yönleri hesaplanır.



Şekil 5.2: Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarlarında bulunan XRD cihazı.



## 5.2 Ferromanyetik Rezonans

FMR bir ferromanyetik malzemenin mıknatıslanmasını, manyetik anizotropisini ve yapısal özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemlerden biridir. FMR, V.K. Arkad'yev tarafından 1911 yılında ferromanyetik malzemenin UHV(ultra high vakuum) yayımının ferromanyetik malzemelerce soğurulmasını gözlemesi ile ortaya çıkan bir tekniktir[44]. İlk FMR deneyi Griffiths tarafından 1946 yılında gerçekleştirilmiştir [45].

FM malzeme statik bir alan içerisine yerleştirildiğinde, malzemenin manyetik momentleri karakteristik  $\omega_0$  frekansıyla presesyon hareketi yaparak denge durumuna geçer. Dışarıdan uygulanan manyetik alan dik yönde uygulanan mikrodalganın frekansı ile manyetik momentlerin Larmor frekansları çakıştığı anda güç soğurulması meydana gelir. Soğurulan bu güç miktarı malzemenin yapısına, dışarıdan uygulanan manyetik alanın büyüklüğüne ve manyetik yönelimine bağlıdır. FMR ile incelenen maddenin manyetik yapısını belirleyen değiş tokuş etkileşim parametresi, hacimsel (bulk) anizotropi enerji yoğunluğu, yüzey anizotropi enerji yoğunluğu, spektroskopik yarıлма faktörü, kristal anizotropi ve benzeri parametreler belirlenir.

Bir manyetik momente manyetik alan uygulandığı zaman, manyetostatik enerjiyi minimize etmek için manyetik momentler uygulanan alanla paralel hale gelir. Bu durumda manyetik momentler denge durumundan çıkarılırsa, manyetik alan tarafından üretilen tork geri getirmeye çalışacaktır [46].

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma (M \times H) \quad (5.2)$$

M mıknatıslanma,  $\gamma$  gyromanyetik oran (spektroskopik yarıлма faktörü) ve H uygulanan dış manyetik alan olarak adlandırılır. Burada sadece dış manyetik alan dikkate alınmıştır. Ancak gerçekte spin-spin manyetik etkileşimleri, spin-örgü manyetik etkileşimleri gibi daha başka manyetik etkileşimlerde söz konusudur. Bu da denklemin sönüm tipi bir ifade içermesini gerektirir. Bunlardan sık kullanılan bazılarını ifade ederek hareket denklemlerini yeniden yazabiliriz.

Eğer sönüm (damping ) topaç hareketine göre küçük ise hareket denklemi için bu ifade Landau-Lifshitz eşitliği olarak adlandırılır ve

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma(M \times H) - \frac{\lambda}{M_0^2} M \times (M \times H) \quad (5.3)$$

olarak ifadelendirilir. Bu ifadede ilk terim topaç hareketini, ikinci terim ise sönümü ifade eder.  $\lambda$  sönüm frekansı,  $\gamma$  spektroskopik yarılmayı ifade eden bir sabittir.

Sönüm terimi için alternatif bir ifade Gilbert tarafından  $\alpha$  sönüm parametresi olmak koşuluyla,

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dM}{dt} = M \times H - \frac{\alpha}{\gamma M_0^2} M \times M \quad (5.4)$$

şeklinde ortaya konulmuştur.

Bloch-Bloembergen tipi sönüm terimi ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dM}{dt} = M \times H - \frac{M_x}{T_2} - \frac{M_x}{T_2} - \frac{M_z - M_0}{T_1} \quad (5.5)$$

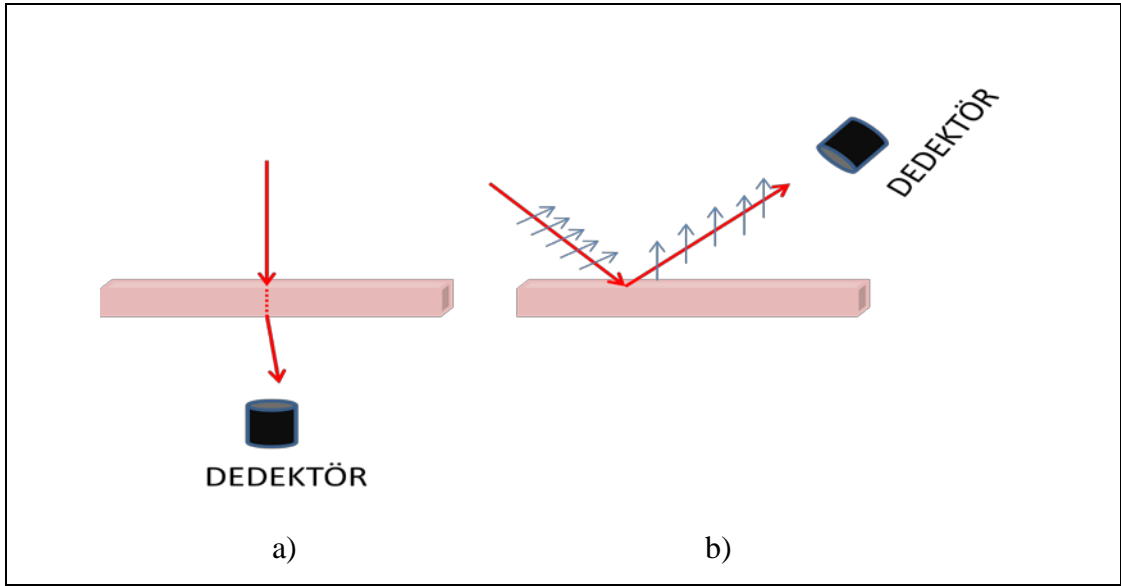
Bu denklemlerde  $T_1$  ve  $T_2$  parametreleri durulma zamanını temsil ederler. Her üç sönüm terimi de soğurma enerjisinde yaklaşık olarak aynı etkiyi gösterirler. Dolayısıyla amaca göre herhangi birisi kullanılabilir.

Bu çalışmada kullanılan FMR ölçümleri Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Bruker EMX marka elektron spin rezonans (ESR) spektrometresiyle elde edilmiştir. Ölçümler X-Band (9.8 GHz) aralığında yapılmıştır. Sistemdeki elektromıknatıs bu ölçümler için 2.2 Tesla'ya kadar dc manyetik alan sağlamaktadır.

### 5.3. Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE)

Işık ve manyetizma arasındaki etkileşim ilk olarak 1845 yılında Faraday tarafından gözlemlenmiştir. Faraday'ın deneyinde manyetik alan uygulanan bir örneğin içerisinden geçirilen ışığın polarizasyonun değişimi ile mıknatıslanması incelendi. 32 yıl sonra 1877 yılında John J. Kerr manyetik alanın uygulandığı bir

örneğin üzerine düşürülen ışığın yansımaları ile değişen polarizasyonla malzemelerin mıknatıslanmasını inceledi.



Şekil 5.3: a) Faraday etkisi, b) Kerr etkisinin şematik gösterimi.

Her iki manyeto-optik etkide de ışığın örnek ile etkileşimi sonucunda polarizasyonunda meydana gelen değişim ile mıknatıslanması dolaylı olarak ölçülmektedir. Şekil 5.3 (a)'da gösterildiği gibi Faraday etkisinde şeffaf bir manyetik malzemedan geçen ışığın polarizasyonunda değişim görülmektedir. Paramanyetik malzemeler için,

$$\theta = V H t \quad (5.6)$$

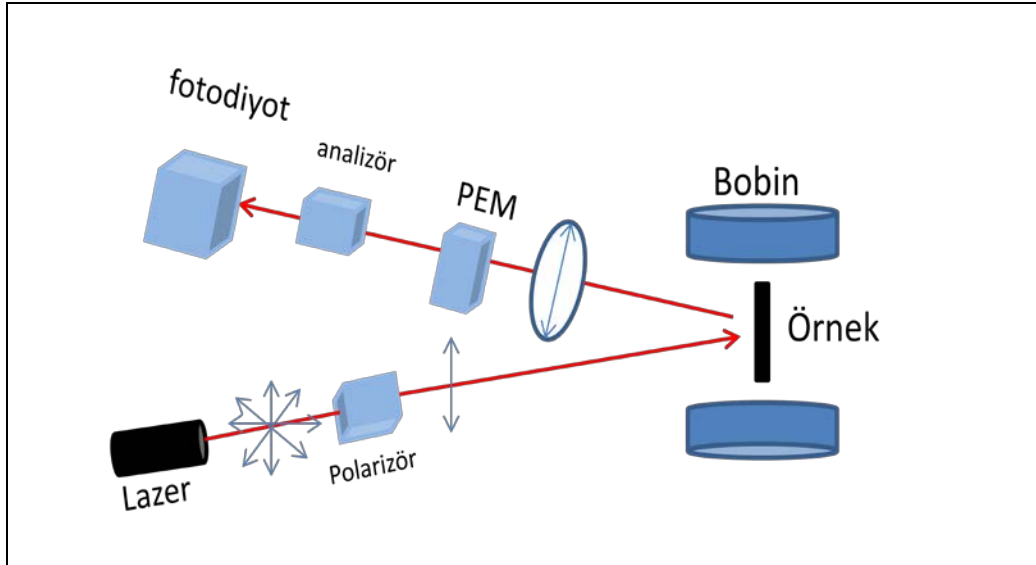
ifadesi tanımlanır. Burada  $\theta$  ışığın manyetik malzemedan geçtikten sonra doğrultusunda meydana gelen değişim,  $t$  manyetik malzemenin kalınlığı,  $H$  uygulanan manyetik alan ve  $V$  Verdet sabiti olarak tanımlanır.

Ferromanyetik malzemeler için,

$$\theta = K M t \quad (5.7)$$

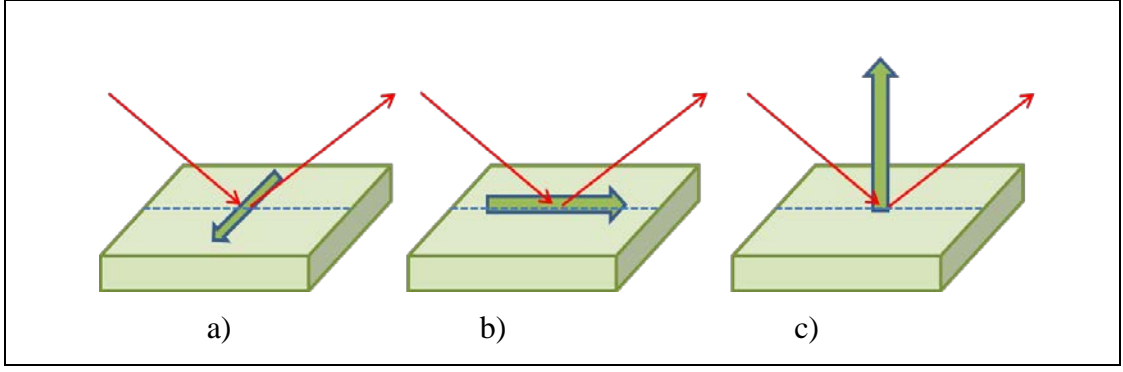
olarak tanımlanır. Burada  $K$  Kundt sabitini,  $M$  FM malzemenin mıknatıslanmasını ve  $t$  FM malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Şekil 5.3 (b)'de polarize bir ışın demeti manyetik bir malzemedan yansıdığında polarizasyonunun eliptik hale geldiği ve ekseninin döndüğü (Kerr rotasyonu) gösterilmektedir. Dönmenin ve eliptikliğinin miktarı malzemenin mıknatıslanması ile doğru orantılıdır. Işığın manyetik bir malzemedan yansmasıyla, polarizasyonundaki değişimin ölçülerek malzemenin mıknatıslanmasının ölçüldüğü metot, Manyeto-optik Kerr Etkisi olarak bilinmektedir. Bu metotta örnek değişken manyetik alan oluşturan bobinler arasına yerleştirilerek (Şekil 5.4), maddenin mıknatıslanmasının değişimi incelenmektedir [57].



Şekil 5.4: MOKE düzenneđi.

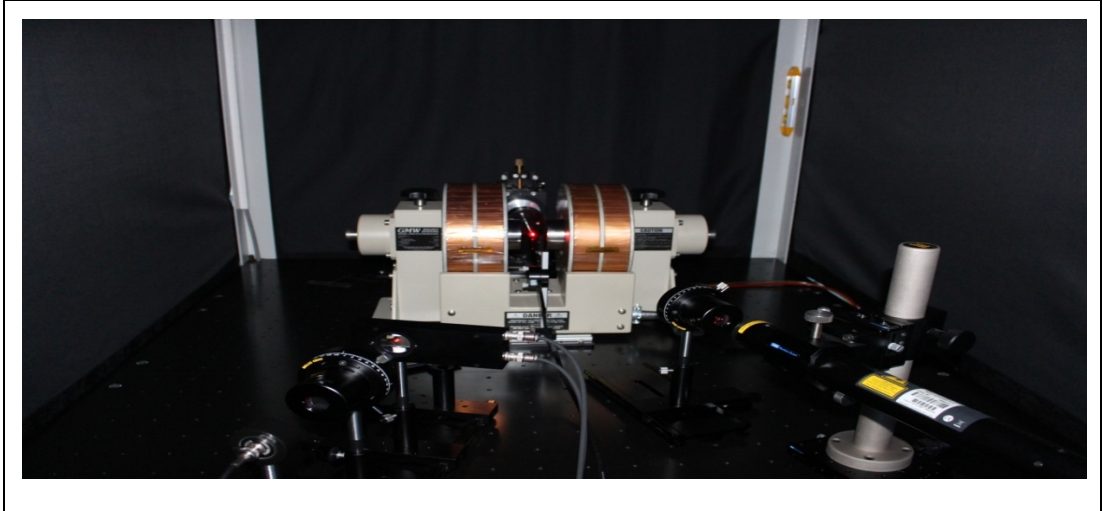
MOKE düzenneğlerinde enine, boyuna ve polar olmak üzere üç türlü ölçüm yapılmaktadır. Şekil 5.5 (a)'da gösterildiği gibi enine Kerr etkisi, mıknatıslanmanın örnek düzleminde ancak gelen ışının düzlemine dik olduğu durumdur. Boyuna Kerr etkisi mıknatıslanmanın örnek düzleminde olup örnek düzleminin boyuna doğru olan etkidir. Polar Kerr etkisi, mıknatıslanmanın örnek düzlemine dik olduğu durumda meydana gelen etkidir [40].



Şekil 5.5: MOKE düzeneğinde a) enine, b) boyuna ve c) polar Kerr etkileri.

Bu üç türlü ölçüm düzeneğinde en çok kullanılan düzenekler boyuna ve polar Kerr etkileridir. Boyuna ve polar Kerr geometrilerinde mıknatıslanma ve ışığın polarizasyonu arasında açı meydana gelmektedir. Enine Kerr etkisinde ise ışığın polarizasyonu ile mıknatıslanma aynı yönde olduğu için bu yöntem tercih edilmez.

Bu tez çalışmasında MOKE ölçümleri için GTÜ Fizik Bölümü'nde bulunan MOKE cihazı kullanıldı.



Şekil 5.6: GTÜ Fizik Bölümü'ndeki MOKE ölçüm sistemi.

#### 5.4. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM)

Titreşimli örnek manyetometresi (VSM), S. Foner tarafından 1956 yılında bulunan [48], manyetik malzemelerin, manyetik özelliklerinin belirlenmesinde

kullanılan bir ölçüm metodudur. Bu yöntemle manyetik malzemelerin histeresis eğrileri, zorlayıcı alanlar, doyum mıknatıslanması ve anizotropi özellikleri belirlenmektedir [49].

Temeli Faraday yasasına dayanan VSM, manyetik alan içerisinde örneğe titreşim hareketi yaptırılarak algılayıcı bobinlerde elektromotor kuvvetinin indüklenmesine sebebiyet verir. İndüklenen emk ile mıknatıslanmanın doğru orantılı olduğu görülür. Faraday'ın indüksiyon yasasını özetleyen genel ifadesi “Bir devrede indüklenen emk, devreden geçen manyetik akının zamanla değişimi ile doğru orantılıdır” şeklindedir.

Faraday yasasını inceleyecek olursak; ilk olarak manyetik akıyı tanımlamamız gerekecek. Manyetik akı birim alandan geçen manyetik alan çizgi sayısıdır.

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \cos\theta \quad (5.8)$$

Manyetik akı denklem (5.8) şeklinde ifade edilir. Burada B uygulanan manyetik alan şiddeti, A ise uygulanan manyetik alanın içinden geçtiği yüzey alanıdır. İndüklenen emk akının zamana bağlı değişimi olduğu için;

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.9)$$

olarak ifade edilir. Denklem (5.8)'i denklem (5.9)'da yerine yazarsak;

$$\varepsilon = - \frac{d(B \cdot A)}{dt} = -A \frac{dB}{dt} \quad (5.10)$$

Emk ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişkiyi buluruz. N tane sarımdan oluşmuş sistemler için emk denklem (5.11) şeklinde ifade edilir.

$$\varepsilon = -NA \frac{dB}{dt} \quad (5.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde B manyetik indüksiyon için uygulanan dış manyetik alanı temsil etmektedir. Mıknatıslanma ve oluşan emk arasındaki ilişki için H terimi;

$$H = \mu_0 M \quad (5.12)$$

şeklinde tanımlanır. Denklem (5.12)'yi denklem (5.11)'de yerine yazarsak;

$$\varepsilon \cdot dt = -NA d(\mu_0 M) \quad (5.13)$$

denklem (5.13) elde edilir ve böylelikle mıknatıslanma ve elektromanyetik kuvvet arasındaki ilişki açıklanır.

Bu tez çalışmasında yapılan VSM ölçümlerinde, Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında bulunan Quantum Design firması tarafından üretilmiş PPMS9T cihazı kullanılmıştır.

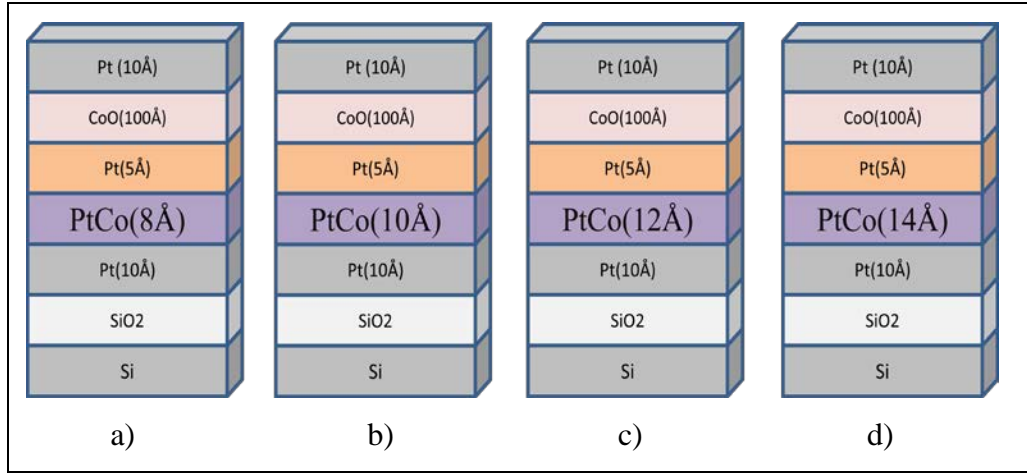


Şekil 5.7: GTÜ Fizik Bölümü VSM laboratuvarı.

## 6.DENEYSEL SONUÇLAR

### 6.1. Örneklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında 4 adet örnek, oksitlenmiş Si (111) üzerine yüksek vakum altında, magnetron saçtırmalı kaplama tekniği ile büyütüldü. Şekil.6.1’de büyütülen örnekler gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Tez çalışmasında hazırlanan örnek sistemleri a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d)PtCo(14Å).

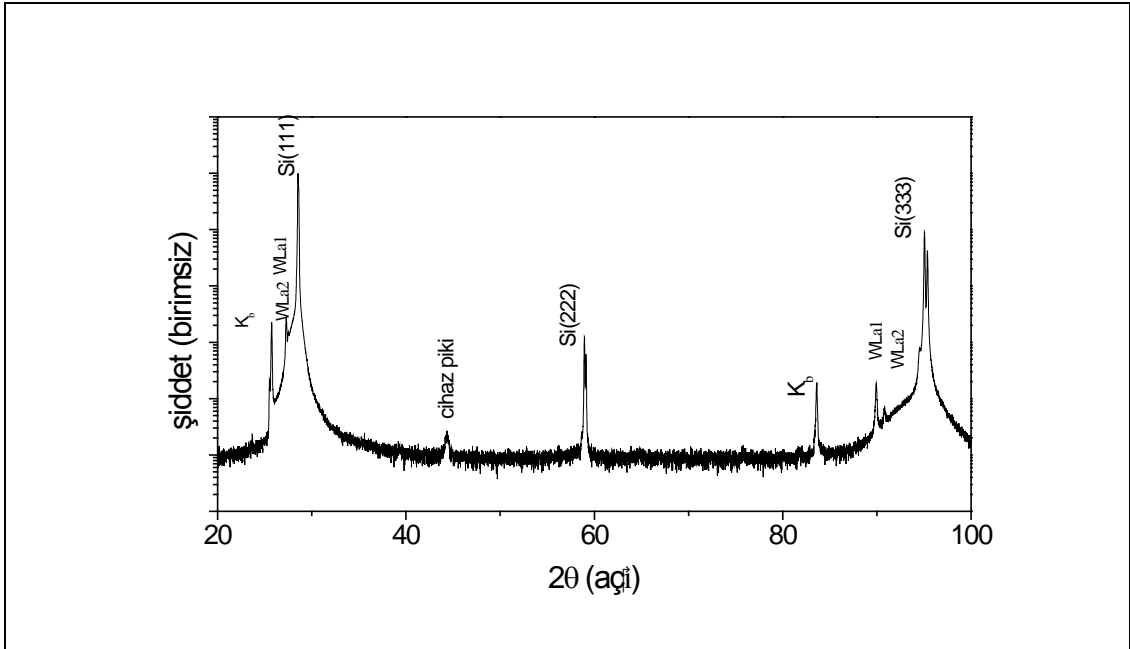
Bu çalışmada kaydırma etkisini araştırmak için ferromanyetik malzeme olarak platin-kobalt (PtCo) ve antiferromanyetik malzeme olarak kobalt-oksit (CoO) kullanıldı. Elmas yapıda olan Si (111) alttaşın üst yüzeyinde SiO<sub>2</sub> olduğu için, PtCo tabakasının oksitlenmemesi amacıyla alttaşın üzerine ilk olarak Pt (10Å) tabakası büyütüldü. Pt (10Å) üzerine her bir örnek için istenilen kalınlıklarda FM tabaka olarak 50/50 oranlarında PtCo büyütüldü. PtCo co-sputtering teknolojisiyle Pt ve Co target kullanılarak hazırlanmıştır. Pt'in kaplama hızı 0.1Å/sn, Co'ın ise 0.3Å/sn olarak önceki çalışmalarda belirlenerek kullanılmıştır [25]. PtCo tabakasının oksitlenmesini engellemek için PtCo ve CoO arasında çok ince Pt (5Å) tabakası büyütüldü. CoO tabaka ise reaktif kaplama ile büyütülmüştür [58]-[59]. CoO'in seçilme sebebi oda sıcaklığına yakın T<sub>N</sub> sıcaklığının (291 K) olması ve bu sayede ölçümlerde kolaylık sağlamasıdır. En üstteki Pt tabakası ise atmosfer ortamında



dışarıdan bir katkı olmaması için koruyucu katman olarak büyütüldü. PtCo ve CoO tabakalarının kimyasal oranları XPS ile tespit edilmiştir [57].

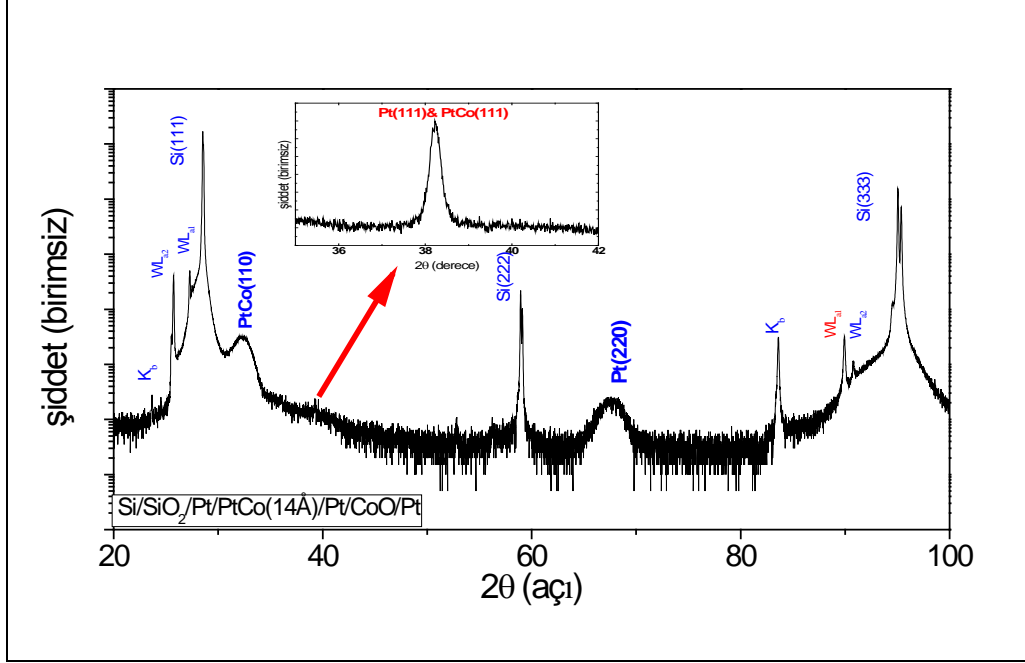
## 6.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

X-ışını kırınım tekniği, büyütülen örneklerin kristal yapısını, kristal yönlerinin ve kristal kusurlarının belirlenmesi için kullanıldı. XRD ile ilk olarak üzerine film kaplanmamış Si (111) alttaş ölçüldü. Şekil 6.2’de sadece Si (111) alttaşa ait XRD ölçümü vardır. Elde edilen piklerin hangi tabakadan kaynaklandığı şekil üzerinde belirtilmiştir. Cu  $K_{\alpha}$  ışınının (1.54 Å) kullanıldığı ölçümlerde  $28.56^{\circ}$  açı değerinde Si alttaşın (111) piki ölçülürken, Si alttaşın (222) tabakasının piki  $59.07^{\circ}$ ’de ve Si alttaşın (333) tabakasının piki de  $95.08^{\circ}$ ’de ölçülmüştür. Si alttaşın (111) ve (333) yüzeylerinden gelen ana piklerin yanında ayrıca küçük uydu piklerde görülmüştür. Bunlar katottan kopup anoda yapışan Tungsten (W) elementinin  $L_{\alpha 1, \alpha 2}$  ışımalarından kaynaklanmaktadır.  $44^{\circ}$  civarında ölçülen pik ise cihazın örnek tutucusundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.2: Üzerine film büyütülmemiş Si (111) alttaşın XRD grafiği.

Si (111) alttaşa ait pikler belirlendikten sonra, büyütülen örneklere ait XRD ölçümleri yapıldı. Şekil 6.3'te örneklerin XRD ölçüm sonuçları verilmiştir. Dört örnek de benzer kristal özelliklere sahip bir şekilde büyümüştür.

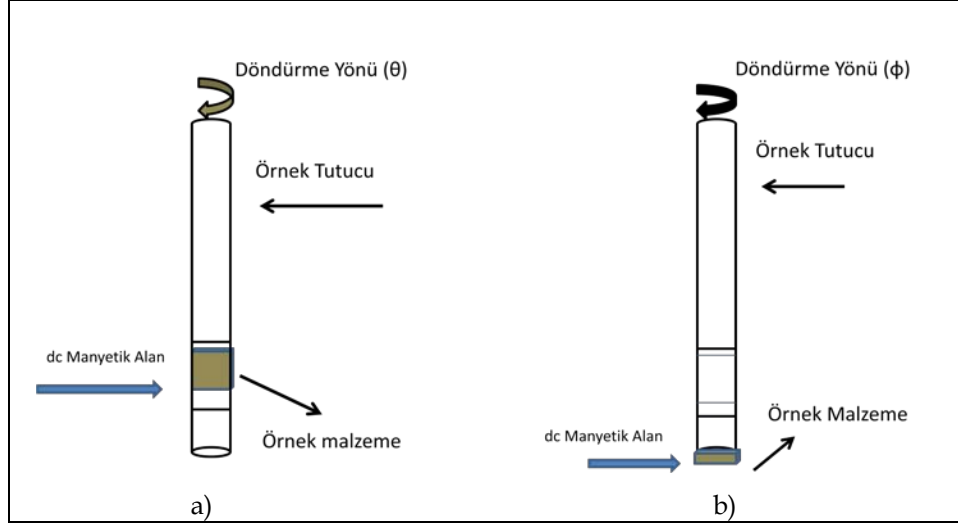


Şekil 6.3: Si/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt örnekleri için XRD grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 6.3'de görüldüğü gibi üzerine film büyütülmemiş Si alttaştan farklı olarak dört örnekte de  $32.51^\circ$ 'de PtCo (110) tabakasının piki,  $39.10^\circ$ 'de PtCo (111) ve Pt(111) tabakalarının pikleri ve  $67.60^\circ$ 'de Pt (220) tabakasının piki gözlemlenmiştir. PtCo (110) piki ve Pt (220) piklerinin geniş çıkması, belirlenen yönelimlerin zayıf olduğunu göstermektedir. Büyütme hızı ve büyütme tekniği de pikin geniş çıkmasına neden olmaktadır.

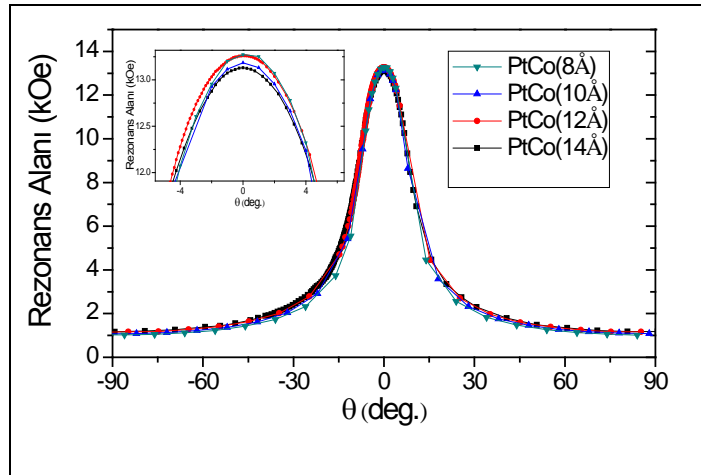
### 6.3. Ferromanyetik Rezonans (FMR) Ölçümleri

FMR, manyetik bir malzemenin manyetik anizotropisini belirlemede kullanılan deneysel tekniklerden biridir. Si/SiO<sub>2</sub>/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt ince filmlerin manyetik anizotropisini belirlemek için örnek düzlemine dik ve örnek düzlemine paralel ölçümler yapıldı. Örnek düzlemine dik ve paralel ölçüm durumu şekil 6.4'te belirtilmiştir.



Şekil 6.4: Örnek yüzeyine a) dik, b) paralel FMR ölçümleri için kullanılan geometriler.

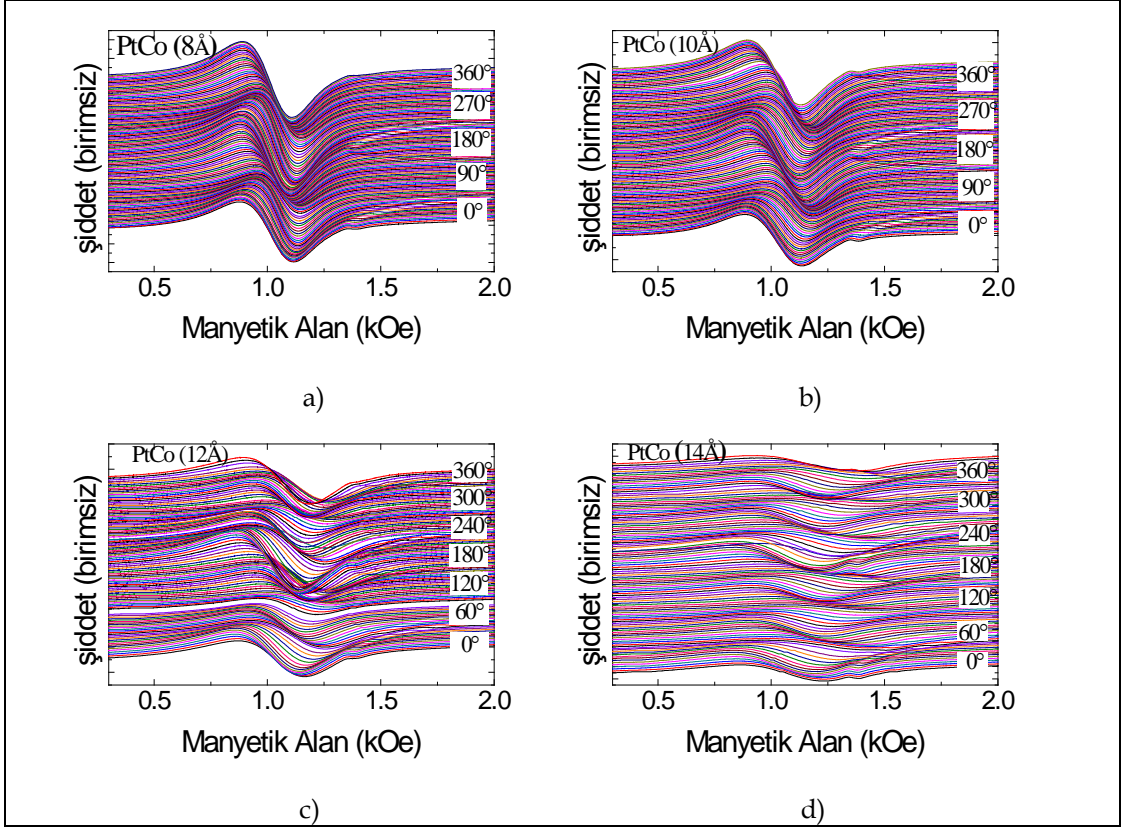
Şekil 6.4 (a)'da belirtildiği üzere dış manyetik alan örnek düzlemine dik, sonra paralel ve sonra tekrar dik olacak şekilde örnek  $180^\circ$  döndürülmüştür. Örnek düzlemine dik ve paralel olarak yapılan bu ölçüm sonucunda FMR sinyallerinin rezonans alanları Şekil 6.5'te döndürme açısı  $\theta$ 'nın bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre her dört örnekte de mıknatıslanmanın kolay ekseninin örnek düzleminde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5: Oda sıcaklığında örnek düzlemine dik geometride 4 örneğin rezonans alanlarının  $\theta$  açısına bağlı değişimi.

PtCo örnekleri için örnek düzleminde ölçülen FMR spektrumları Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Tüm örneklerin spektrumları,  $\varphi=0^\circ$ 'den  $360^\circ$ 'ye kadar  $3^\circ$ 'lik adımlarla elde edilmiştir. Spektrumlardan açıkça görüleceği gibi PtCo kalınlığı arttıkça tek

eksenli anizotropiden altı-kollu anizotropiye bir geçiş olmaktadır. 8Å ve 10Å'lık örneklerde tek eksenli anizotropi gözlemlenirken PtCo kalınlığı arttıkça altı-kollu anizotropi gözlemlenmektedir. Bu davranış Si (111) ile FM PtCo tabakası arasında iyi bir uyumun olduğunu ve kalınlık arttıkça bu uyumun da arttığını ortaya koymaktadır.

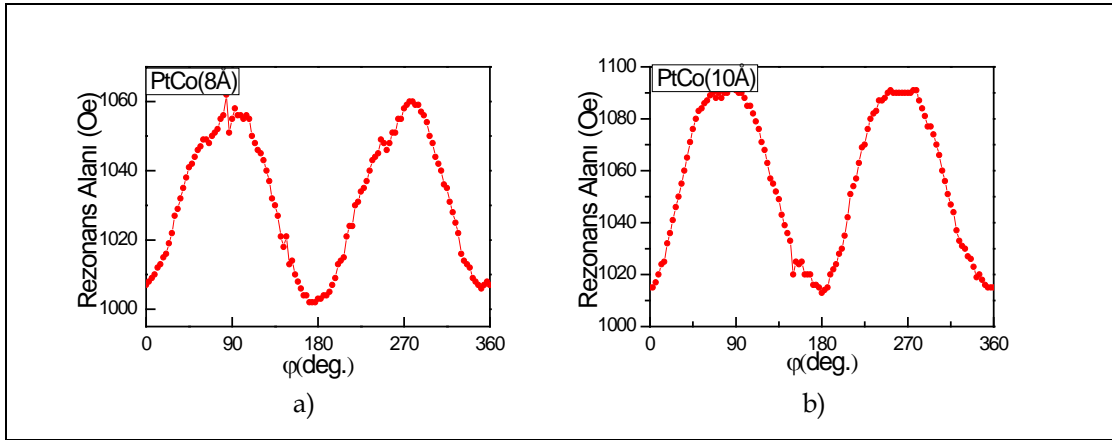


Şekil 6.6: Oda sıcaklığında örnek düzleminde ölçülen a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) örneklerin FMR spektrumları.

Şekil 6.7'de 8Å ve 10Å kalınlığındaki örneklerin FMR sonucunda açıya bağlı rezonans alanları ölçülmüştür. Her iki grafikte de tepe noktalar zor eksenleri, çukur noktalar kolay eksenleri göstermektedir. İki örnekte de tek eksenli anizotropinin varlığı gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak büyütmeden kaynaklanan anizotropiyle (growth induced) açıklandı. Denklem 6.1 ile sistemin toplam enerjisi gösterilmektedir. Denklem 6.1'de tek eksenli anizotropinin daha baskın olduğu ifade edilmektedir.

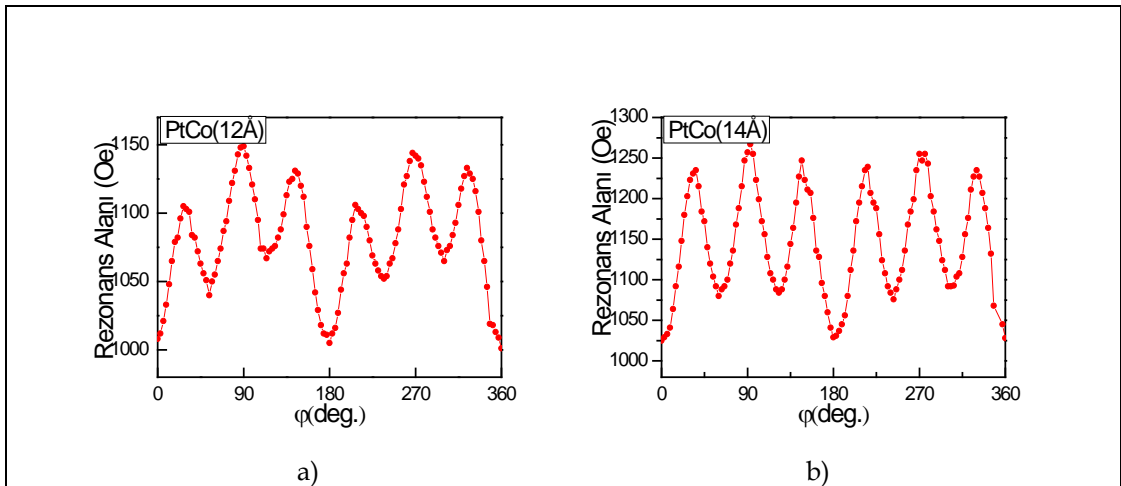
$$E_a = \frac{K_1}{4} + \frac{K_2}{108} (1 + \cos 6\alpha) + K_u \sin^2(\alpha - \alpha_u) \quad (6.1)$$

$K_u$ , tek eksenli manyetik anizotropi sabiti ve  $\alpha_u$ , tekeksenli manyetik anizotropi sabiti ve kristal yönelim arasındaki açı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 6.7: Oda sıcaklığında örnek düzlemi geometride a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å) örnekleri için rezonans alanlarının açığa bağlı değişimi.

12Å ve 14Å kalınlığındaki örnekler için Şekil 6.8'de FMR spektrumlarından elde edilen rezonans alanlarının açığa bağlı değişimi verilmiştir. 12Å ve 14Å kalınlığındaki örnekler tek eksenli anizotropi ve altı kollu anizotropiye sahip oldukları Şekil 6.8 ile gösterilmektedir.



Şekil 6.8: Oda sıcaklığında örnek düzlemi geometride a) PtCo(12Å), b) PtCo(14Å)'luk örnekler için rezonans alanlarının açığa bağlı değişimleri.

Bu ölçüm sonucunda PtCo filmlerinin kübik yapıda ve (111) yönelimine sahip olduğu söylenebilir. Kübik kristallerde (111) yönetime sahip yüzeyler için

manyetokristal anizotropi yoğunluğu denklem (6.1)'deki gibi ifade edilmektedir [50]-[51].

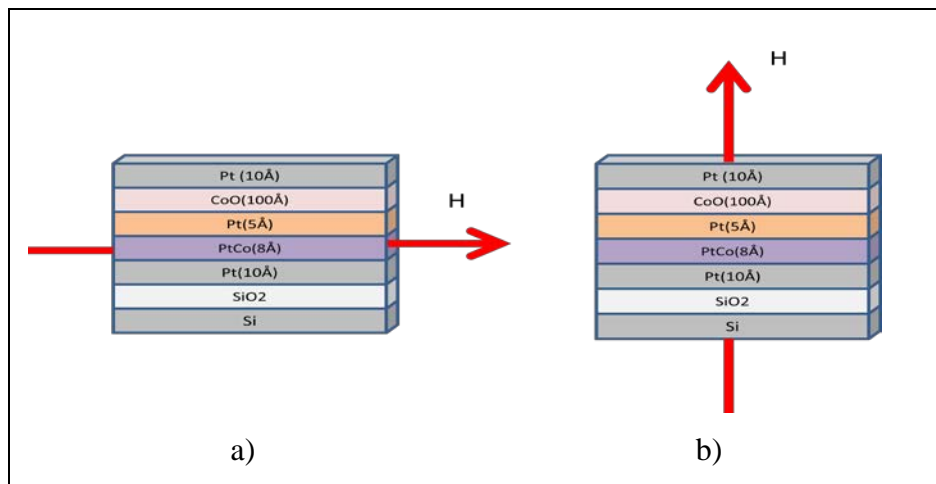
$$E_a = \frac{K_1}{4} + \frac{K_2}{108}(1 + \cos 6\alpha) + K_u \sin^2(\alpha - \alpha_u) \quad (6.2)$$

Burada  $\alpha$  mıknatıslanma ve kristal yönelim arasındaki açı ve  $K_1$ ,  $K_2$  kübik anizotropi sabitleridir.

FMR ölçümleri ile PtCo tabakasının kalınlığı arttıkça, anizotropisinde arttığı gözlemlendi. Denklem (6.2) ile ifade edilen  $\cos 6\alpha$  terimi ve  $K_2$  kübik anizotropi sabitinin baskın olması (111) yüzeyinde altı-kollu simetrinin varlığını ortaya çıkarmaktadır.

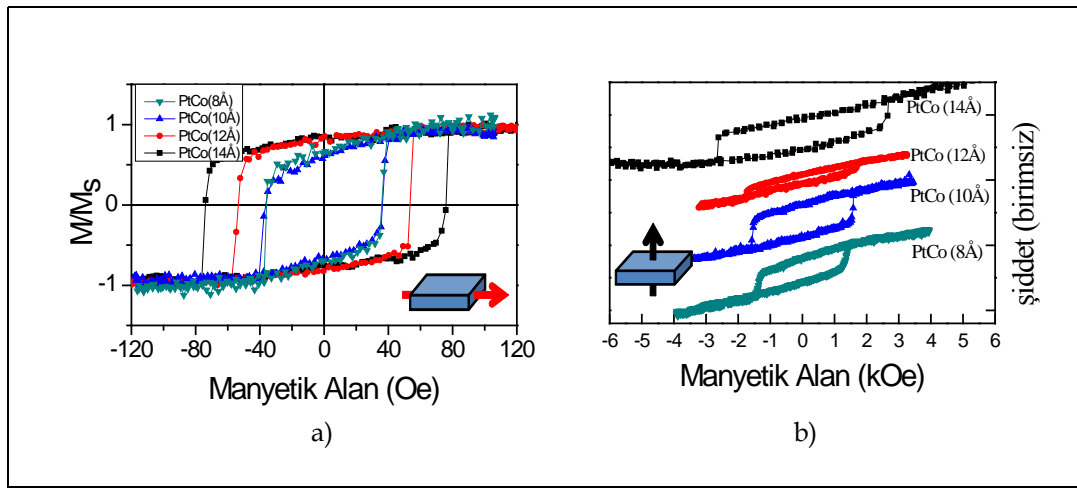
#### 6.4. Manyeto-optik Kerr Etkisi (MOKE) Ölçümleri

Örneklerin oda sıcaklığında histeresis eğrileri ile kolay eksenlerini belirlemek için MOKE tekniği kullanıldı. Örneklerin hangi yönde daha kolay mıknatıslandığını belirlemek için örnek düzlemine paralel ve dik manyetik alan uygulandı. Şekil 6.9 (a,b)'de uygulanan manyetik alanın örneğe paralel ve dik olduğu durumlar gösterilmiştir.



Şekil 6.9: a) Örnek düzlemine a) paralel, b) örnek düzlemine dik uygulanan manyetik alanlar gösterilmiştir.

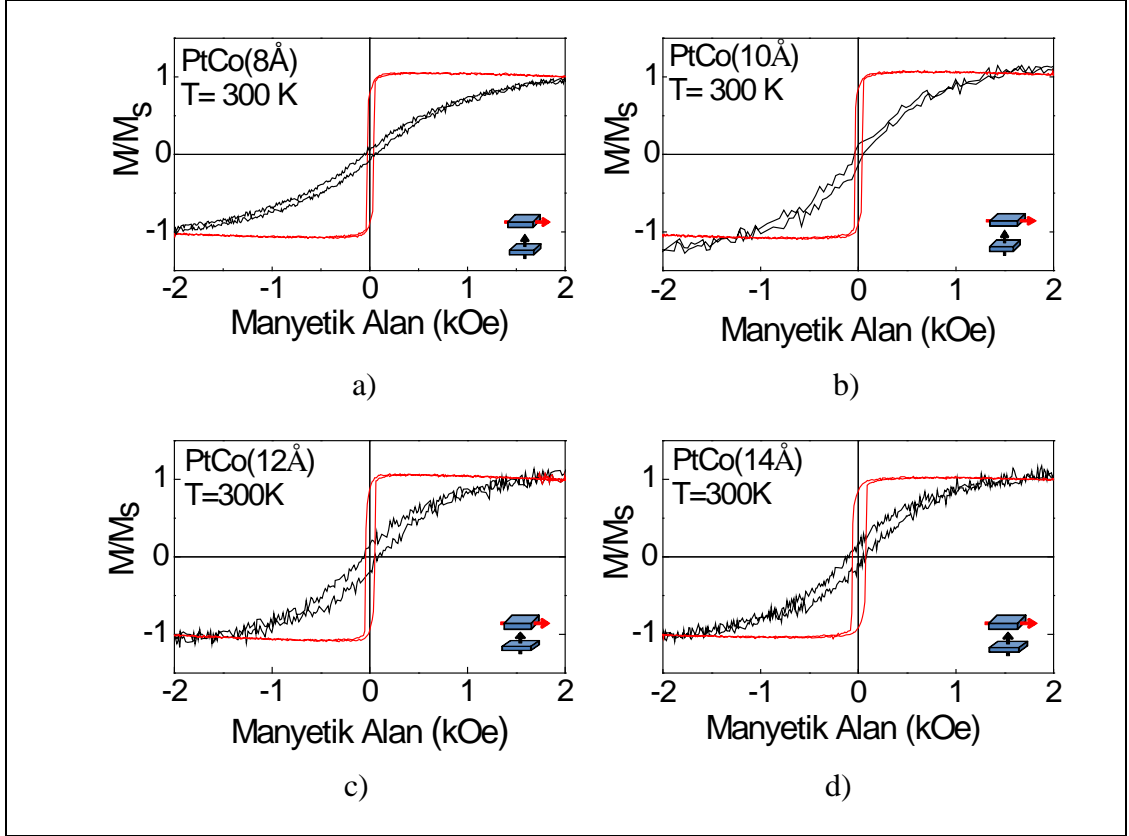
Şekil 6.10'da görüldüğü gibi örnek düzlemine paralel manyetik alan uygulandığında bütün örneklerin mıknatıslanması daha düşük alanlarla doyuma ulaşırken (a), örnek düzlemine dik manyetik alan uygulandığında ise daha fazla manyetik alan ile doyuma ulaşmışlardır (b). Oda sıcaklığında yapılan L-MOKE ölçümlerine göre örneklerin mıknatıslanmasının kolay ekseninin örnek düzlemine paralel, zor ekseninin ise örnek düzlemine dik olduğu anlaşılmıştır. PtCo kalınlığı arttıkça zorlayıcı alanlarda genişleme gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak FMR dataları ile elde ettiğimiz kalınlık arttıkça anizotropinin arttığı sonucu olarak ifade edilebilir..



Şekil 6.10: Örneklerin oda sıcaklığında L-MOKE ile örnek düzlemine a) paralel, b) dik ölçülen histeresis eğrileri.

## 6.5. Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) Ölçümleri

Örneklerin düşük sıcaklıklarda manyetik özelliklerini ve kaydırma etkisini gözlemlmek için VSM tekniği kullanıldı. Şekil 6.11'de 300K'de VSM ile örnek düzleminde ve örnek düzlemine dik uygulanan manyetik alan altında ölçülen mıknatıslanma eğrileri verilmektedir.



Şekil 6.11: Örneklerin 300K’de örnek düzlemine paralel ve dik ölçülen a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) histeresis eğrileri

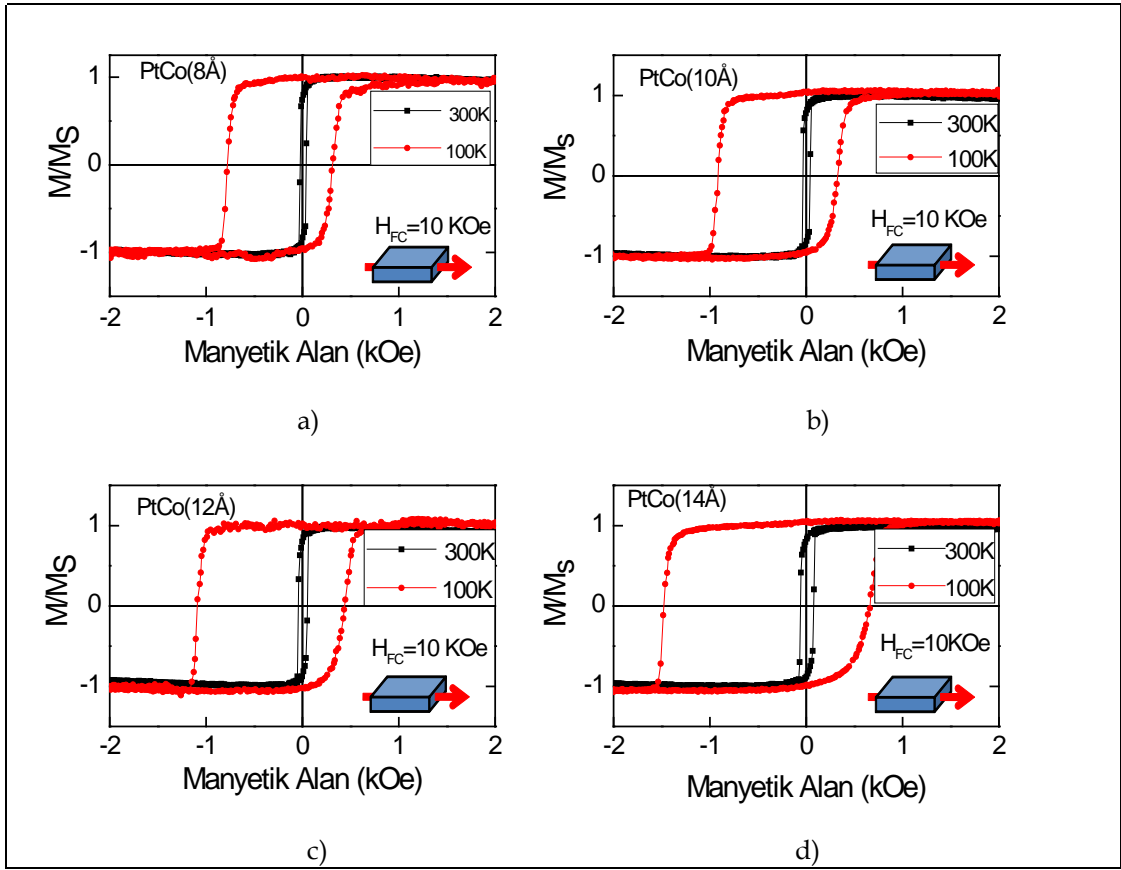
Oda sıcaklığında VSM ile elde ettiğimiz ölçümler MOKE’ta elde ettiğimiz ölçümlerle aynı sonuçları vermiştir. Dört örnekte de mıknatıslanma örnek düzlemine paralel uygulanan düşük manyetik alan ile doyuma ulaşmaktadır. Örneklerde, mıknatıslanmanın kolay ekseninin örnek düzleminde olduğu görülmekte ve PtCo kalınlığı arttıkça zorlayıcı alanların arttığı gözlemlenmektedir.

### 6.5.1. Kaydırma Etkisi Ölçümleri

Örneklerin anizotropisi belirlendikten sonra kaydırma etkisini gözlemlemek için VSM ile ölçümler yapıldı. AFM malzeme olarak kullanılan CoO’in  $T_N$  değeri 291 K olduğundan, AFM malzemenin spinlerini düzenli hale getirmek için, oda sıcaklığında ( $T=305K$ ) 2kOe alan uygulandı ve hedef sıcaklıklara soğutularak histeresis eğrileri ölçüldü. Her bir sıcaklık değeri için bu işlem tekrarlandı.

Her bir örnek için kaydırma etkisi ölçümleri kolay eksen yönünde yapıldı. Şekil 6.12’de örneklerin 300K’deki ve 100 K’deki histeresis eğrileri verilmiştir.





Şekil 6.12: (a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) örneklerin 100K ve 300K’de ölçülen histeresis eğrileri.

Şekil 6.12’de görüldüğü gibi dört örnekte de manyetik alan altında soğutulma ile kaydırma etkisi görülmüştür. FM ve AFM malzemeler arasında konulan 5Å kalınlığındaki Pt’nin kaydırma etkisine engel olmadığı da görülmüştür.

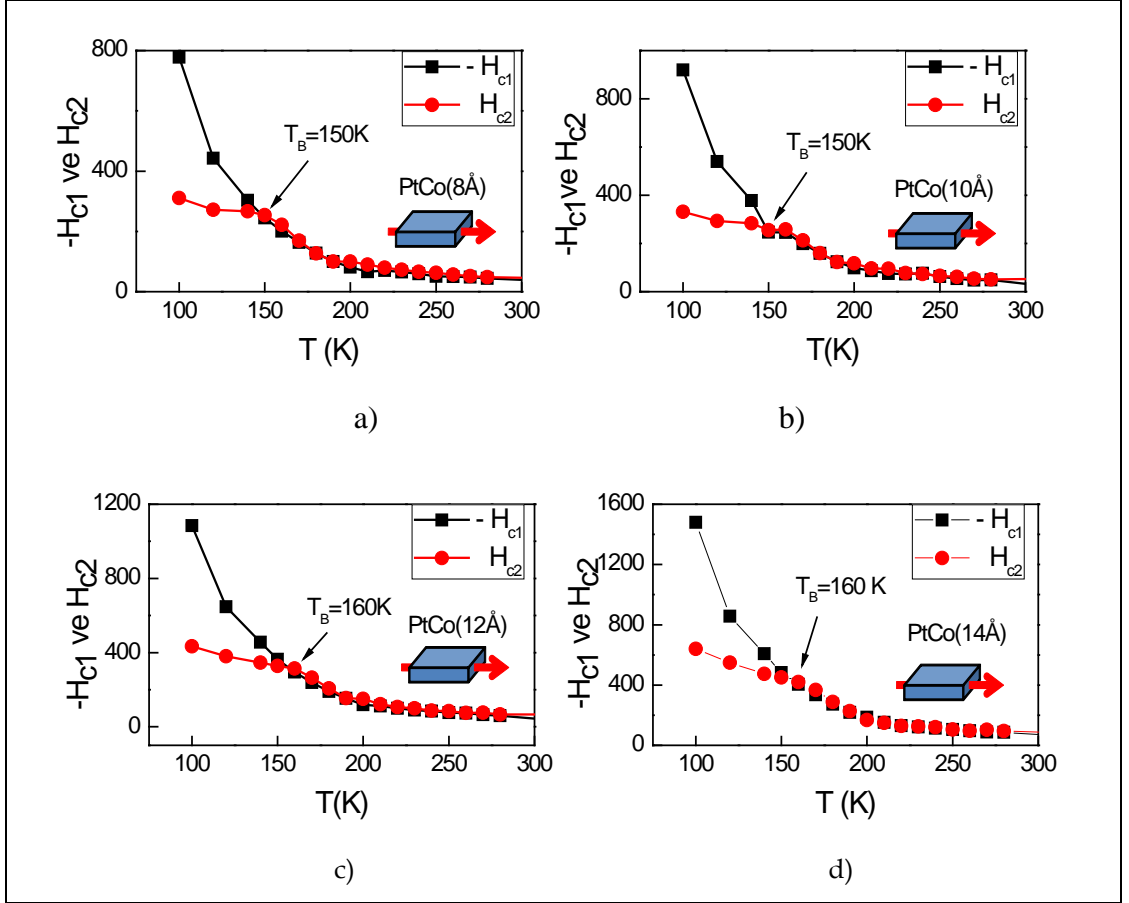
Tablo 6.1: 100 K’de ölçülen histeresis eğrileri için zorlayıcı alanlar ( $-H_{c1}$ ,  $H_{c2}$  ve  $H_c$ ) ve kaydırma etkisi alanı ( $H_{EB}$ ) değerleri.

PtCo Tabakasının Kalınlığı	$\frac{1}{t_{PtCo}}$	$-H_{c1}$	$H_{c2}$	$H_c$	$-H_{EB}$
8 Å	1.250	778	311	544.5	233.5
10Å	1.000	920	331	625.5	294.5
12Å	0.833	1084	434	759.0	325.0
14 Å	0.714	1480	640	1060.0	420.0

Tablo 6.1’de 100K’de ölçülen histeresis eğrilerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. PtCo kalınlığı arttıkça zorlayıcı alanlarda ve KE’de artma

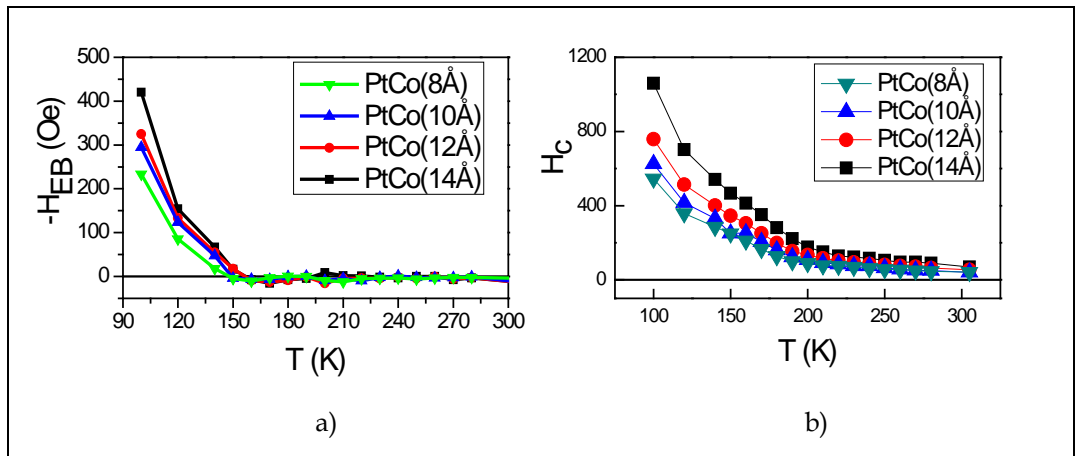
gözlemlenmiştir. Bölüm 4’te verilen denklem (4.10) ve denklem (4.11) ile Tablo 6.1’de verilen  $H_{EB}$  ve  $H_c$  değerleri hesaplanmıştır.

Kaydırma etkisini daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için farklı sıcaklık değerlerinde de ölçümler alındı. Şekil 6.13’te farklı sıcaklıklarda alınan histeresis eğrilerinden okunan zorlayıcı alanların sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.13’teki grafikte  $H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi dört örnek için verilmiştir. Örnekler için oda sıcaklığından aşağıya inilirken ilk başta zorlayıcı alan değerleri eşitken sonradan bu eşitlik bozulmuştur. Bu farklılaşmanın gözlemlendiği sıcaklığa engelleme sıcaklığı ( $T_B$ ) denilmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen örnekler için engelleme sıcaklığı 150K-160K civarında bulunmuştur. 8Å ve 10Å kalınlığındaki örneklerde 150 K civarında  $H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  değerlerinde farklılaşma gözlemlenirken, 12Å ve 14Å kalınlığındaki örneklerde 160 K civarında  $H_{C1}$  ve  $H_{C2}$  değerlerinde farklılaşma gözlemlendi. Bu sıcaklıktan itibaren daha düşük sıcaklıklarda histeresis eğrilerinde kayma görülmektedir. Genellikle  $T_B$  değerinin AFM malzemenin  $T_N$  değerine eşit olması beklenir. Fakat AFM malzeme içinde farklı fazların olması, malzemenin ince film yapısında olması ya da diğer ara yüzey etkileşimleri gibi sebeplerden dolayı  $T_N$  değeri beklenin altında çıkabilir [11].



Şekil 6.13: Zorlayıcı alanlar ve sıcaklık ilişkisi: Engelleme sıcaklığının a) PtCo(8Å), b) PtCo(10Å), c) PtCo(12Å), d) PtCo(14Å) örnekleri için belirlenmesi.

Şekil 6.14(a)'da PtCo kalınlığına bağlı  $H_{EB}$  değerleri karşılaştırıldığında, PtCo kalınlığı ile kaydırma etkisi değerlerinin doğru orantılı olduğu gözlemlendi. Şekil 6.14 (b)'de ise kalınlık arttıkça zorlayıcı alan değerlerinin arttığı gözlemlendi.



Şekil 6.14: a) Kaydırma etkisinin, b) zorlayıcı alanın sıcaklığa ve PtCo kalınlığına bağlı davranışı.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, Si/SiO<sub>2</sub>/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt çok katlı ince filmlerde PtCo tabakasının kalınlığına bağlı olarak (8Å, 10Å, 12Å ve 14Å) yapısal ve manyetik özelliklerin değişimi incelendi. Örnekler, yüksek vakum koşullarında magnetron saçırma tekniği kullanılarak büyütüldü. PtCo ve CoO tabakalarının kimyasal kompozisyonu XPS tekniğiyle belirlenmiştir.

Örneklerin yapısal özellikleri için XRD tekniği kullanıldı. XRD tekniği ile örneklerin polikristal yapıda olduğu görüldü. Si (111) alttaş üzerine büyütülen PtCo ile Pt katmanlarının zayıf (111) yönelime sahip olduğu görüldü.

Örneklerin manyetik özelliklerinin belirlenmesi için FMR, MOKE ve VSM teknikleri kullanıldı. Öncelikle FMR ile manyetik anizotropiler belirlendi. 8Å ve 10Å kalınlığındaki örneklerin örnek düzleminde tek eksenli anizotropiye sahip olduğu, 12Å ve 14Å kalınlığındaki örneklerin ise eksensel anizotropi ile birlikte altı-kollu anizotropiye sahip olduğu gözlemlendi. MOKE ile oda sıcaklığında, örneklerin kolay eksenlerinin belirlenmesi için, örnek düzlemine dik ve paralel manyetik alan uygulanarak histeresis eğrileri ölçüldü. L-MOKE ölçümlerine göre Si/SiO<sub>2</sub>/Pt/PtCo/Pt/CoO/Pt örneklerin örnek düzleminde mıknatıslanmaya sahip olduğu belirlendi.

VSM tekniği ile manyetik alan atında soğutma işlemleri yapılarak histeresis ölçümleri yapıldı. Düşük sıcaklıklara gidildikçe (100K) histeresis eğrisinde kaydırma etkisinin arttığı gözlemlendi. Bunun sonucu olarak zorlayıcı alan değerleri büyüdü ve soğutma için uygulanan manyetik alan yönünün tersine doğru bir kayma gözlemlendi.

Engelleme sıcaklığı, PtCo'ın 8Å ve 10Å kalınlıklarda olduğu örnekler için 150K olarak bulunurken, PtCo'ın 12Å ve 14Å olduğu örnekler için 160K olarak belirlendi.

Kaydırma etkisinin PtCo tabakasının kalınlığına bağlı olarak arttığı gözlemlendi. Bu durum PtCo tabakasının kalınlığının artmasıyla hacim anizotropisinin baskın hale gelmesiyle açıklandı.

## KAYNAKLAR

- [1] Wang J., Sannomiya T., Shi J., Nakamura Y., (2013), “Perpendicular Magnetic Anisotropy and Perpendicular Exchange Bias in Sputter-Deposited CoO/CoPt Multilayer”, Journal Of Applied Physics, 113, 17D714.
- [2] Baibich M. N., Broto J.M., Fert A., Nguyen Van Dau F., Petroff F., (1988), “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices”, Physical Review Letters, 61 (21), 2472-2475.
- [3] Binasch G., Grünberg P., Sauenbach F., Zinn W., (1988), “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer Exchange”, Physical Review B, 39 (7), 4828-4830.
- [4] Prinz G. A., “Magnetoelectronics”, Science. 282(5394), 1660-1663.
- [5] Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M., von Molnar S., Roukes M.L., Chtchelkonavo A.Y., Treger D.M., (2001), “Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future”, Science, 294 (5546), 1488-1495.
- [6] Fert A., (2008), “Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics”, Reviews of Modern Physics, 80 (4), 1517-1530.
- [7] Thompson S.M., (2008), “The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007”, Journal Of Physics, 41(9),093991.
- [8] Meiklejohn W., Bean C.P., (1956), “New Magnetic Anisotropy”, Physical Review, 102 (5), 1413-1414.
- [9] Meiklejohn W., Bean C.P., (1957), “New Magnetic Anisotropy”, Physical Review, 105 (3), 904-913.
- [10] Wang J., Omi T., Sannomiya T., Shi J., Muraishi S., Nakamura Y., (2013), “Strong Perpendicular Exchange Bias In Sputter-Deposited CoPt/CoO Multilayers”, Applied Physics Letters, 103,042401.
- [11] Demirci E., Öztürk M., Sınır E., Ulucan U., Akdoğan N., Öztürk O., Erkovan M., (2014), “Temperature-Dependent Exchange Bias Properties of Polycrystalline PtCo/CoO Bilayers”, Thin Solid Films, 550 595-601.
- [12] Yuan F.T., Chang H.W., Lee P.Y., Chang C.Y., Chi C.C., Ouyang H., (2014), “Perpendicular magnetic anisotropy of non-epitaxial hexagonal CoPt thin films prepared at room temperature”, Journal of Alloys & Compounds, 628, 263-266.

- [13] An H., Xie Q., Wang J., Sannomiya T., Muraishi S., Zhang Z., Nakamura Y., Shi J., (2015), “Highly (001) oriented L10-CoPt/TiN multilayer films on glass substrates with perpendicular magnetic anisotropy”, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 33, 021512.
- [14] An H., Takada S., Sannomiya T., Muraishi S., Shi J., Nakamura Y., (2013), “Effect of Substrate Temperature on the Magnetic Properties and Internal Stress of CoPt/AlN Multilayer Deposited by dc Magnetron Sputtering”, *Applied Physics A*, 113:32-35.
- [15] Wang Y., Zhang X., Liu Y., Jiang Y., Zhang Y., Yang J., (2014), “Enhanced Magnetic Behaviors of CoPt Nanoparticles by Addition of SiO<sub>2</sub>”, *Journal of Solid State Chemistry*, 213 204-209.
- [16] Yang Y., Varghese B., Tan H.K., Wong S.K., Piramanayagam S.N., (2014), “Microstructure investigations of hcp phase CoPt thin films with coercivity”, *Journal of Applied Physics*, 115, 083910.
- [17] Huang Y. H., Okumura H., Hadjipanayis G. C., (2002), “CoPt and FePt nanowires by electrodeposition”, *Journal of Applied Physics*, 91, 10.
- [18] Pai C., Nguyen M., Belvin C., Vilela-Leao L. H., (2014), “Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy and transmission of spin-Hall-effect-induced spin currents by a Hf spacer layer in W/Hf/CoFeB/MgO layer structures”, *Applied Physics Letter*, 104, 082407.
- [19] Web 1, <http://education.jlab.org/itselemental/ele027.html>, Eriřim (06/16/2015).
- [20] Massalski T. B., Murray J.J., (1986), “L.H. Bennet, H.Baker, Binary alloy phase diagrams”, American Society for Metals.
- [21] Cullity B. D., Braham C.D., (2009), “Introduction to Magnetic Materials”, 2nd edition, John Wiley & Sons.
- [22] Nie X., Jiang J.C., Meletis E.I., (2003), “Synthesis, structure, and magnetic properties of  $\epsilon$ -Co nanocrystalline thin films and annealing effects”, *Journal of Applied Physics*, 93 (8) 4750- 4755.
- [23] Sanchez J. M., Moran-Lopez J. L., Leroux C., Cadeville M.C., (1989), “Magnetic Properties and Chemical Order in Co-Pt”, *Journal of Physics of Condensed Matter* 1, 491-496.
- [24] Web 2, (2015), <http://table.minutephysics.com/#mag>, (Eriřim Tarihi: 24/03/2015).
- [25] Erkovan M., (2010.), “Ultra İnce Geçiş Metal Filmlerin (PtCo, Py/Cr) Kristalografik Yapıları ve Magnetik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [26] Web 3, (2015), <http://arxiv.org/abs/1401.0227v2>, (Eriřim Tarihi: 01/09/2015)

- [27] Skomski R., Kashyap A., Sellmyer D. J., (2003), "Finite-Temperature Anisotropy of PtCo Magnets" IEEE Transactions on Magnetics, 39, 5.
- [28] Skomski R., (1998) "Magnetoelectric Néel anisotropies", IEEE Transactions on Magnetics, 34, 1207-1209.
- [29] Massalski T. B., Murray J.J., (1986) "L.H. Bennet, H.Baker, Binary alloy phase diagrams", American Society for Metals.
- [30] Fisher B., Tannhauser D. S., (1964). Electrochemical Sociate, 11, 1194.
- [31] Wagner J. B., (1968), "In Mass Transport in Oxides", NBS Special Publication, 1597.
- [32] Tombs N.C., Rooksby H.P., (1950), "Structure of Monoxides of some Transition Elements at Low Temperatures", Nature (Lond.) 165, 442.
- [33] Greenwald S., (1953), "The antiferromagnetic structure deformations in CoO and MnTe"Acta Crystallographica, 6, 396.
- [34] Nowak G., Remhof A., Radu F., Nefedov A., Becker H. W., Zabel H., (2007), "Structural and Magnetic Properties of Stoichiometric Epitaxial CoO/Fe Exchange-Bias Bilayers", Physical Review B 75, 174405 (1-8).
- [35] Garcia F., Moritz J., Ernult F., Auffret S., Rodmacq B., Dieny B., Camarero J., Pennec Y., Pizzini S., Vogel J., (2002), "Exchange Bias With Perpendicular Anisotropy in (Pt-Co)<sub>n</sub>-FeMn Multilayers", IEEE Transactions on Magnetics, 38, 5.
- [36] Yağmur A., (2013), "Çok katlı İnce Filmlerse Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Master Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [37] Néel L., (1954), "L'approche a la Saturation de la Magnetostriction", Journal Physics Rad, 15,376.
- [37] Ulucan U., 2012, "CoO/PtCo İnce Filmlerde Kaydırma (Exchange Bias) Etkisi", Master Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [38] Kusche T., (2011), "Magnetic anisotropy of transition metal based thin films investigated by magneto optic Kerr effect", Doctoral Thesis, Fachbereich Physik der Universität.
- [39] Nogués J., Ledermann D., Moran T. J., Schuller I. K., (1996), "Positive exchange bias in FeF<sub>2</sub>-Fe bilayers",Physical Review Letter, 76, 4624.
- [40] Nogués J., Schuller I. K., (1999), "Exchange Bias", Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 192 (2), 203-232.

- [41] Radu F., (2005), "Fundamental Aspects of Exchange Bias Effect in AF/F Bilayers and Multilayers", Doctoral Thesis, Ruhr Üniversitesi.
- [42] Mitsunaga T., "X-ray thin-film measurement techniques", 2nd edition, Technical article, Rigaku.
- [43] Kittel C., "Introduction to Solid State Physics", 8th edition, John Wiley.
- [44] Arkad'ev V. K., (1912), "Electromagnetic Processes in Metals", Russian Journal of Physical Chemistry, 165.
- [45] Griffiths J. H. E., (1946), "Anomalous High-frequency Resistance of Ferromagnetic Metals", Nature, 158,670.
- [46] Garcia J. F. S., (2008), "Magnetization Dynamics in Magnetic and Superconducting Nanostructures", October.
- [47] Ali M., (1999), "Magneto Optic Kerr Effect (MOKE)" Doctoral Thesis, The University of Sheffield.
- [48] Foner S., "Versatile and sensitive Vibrating-Sample Magnetometer", Review of Scientific Instruments, 30 (7), 548-557 (1959).
- [49] Burgei W., Penchan M.J., Jaeger H., (2003) "A simple vibrating sample magnetometer for use in a materials physics course", American Journal of Physics, 71 (8).
- [50] Garreau G., Hajjar S., Bubendoff J. L., Pirri C., (2005) "Growth and magnetic anisotropy of Fe films deposited on Si(111) using an ultrathin iron silicide template", Physical Review Letter B 71, 094430.
- [51] Yaegashi S., Kurihara T., Satoh K., (1997), "Preparation and soft magnetic properties of epitaxial Fe-Si(111) monolayer films and Fe-Si(111)/Cr(111) multilayer films", Journal of Applied Physics 81, 6303.
- [52] Kappenberger P., Kortright J. B., Hellwing O., Pellmont Y., Martin S., Fullerton E. E., Hug H. J., (2003), "Direct Imaging and Determination of the Uncompensated Spin Density in Exchange-Biased CoO/CoPt Multilayers", Physical Review Letter, 91(26), 267202.
- [53] Takano K., Kodama R. H., Cao W., Thomas G., Berkowitz A. E., (1997), "Interfacial Uncompensated Antiferromagnetic Spins: Role in Unidirectional Anisotropy in Polycrystalline Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> Bilayers", Physical Review Letter, 79(6), 1130-1133.
- [54] Takano K., Berkowitz A. E., Kodama R. H., Cao W., Thomas G., (1998), "Role of Interfacial Uncompensated Spin in Exchange Biasing", Journal of Applied Physics, 83(11), 6888.



- [55] Eimüller T., Kato T., Mizuno T., Tsunashima S., Quitmann C., Ramsvik T., Iwata S., Schütz G., (2004), “Uncompensated Spins in a Micro-Patterned CoFeB/MnIr Exchange Bias System”, Applied Physics Letter, (12), 2310.
- [56] Kiwi M., Mejia-Lopez J., Portugal R.D. , Ramirez R., (1999), “Exchange Bias Model for Fe/Fef2: role of Domains in the Ferromagnet”, Europhysics Letter, 48(5), 573-579.
- [57] Li W., (2010), “Magneto-optical Kerr Effect Spectroscopy Study of Ferromagnetic Metal/Organic Heterostructures”, Doctoral Thesis, Technische Universtat Chemnitz.
- [58] Parlak U., (2014), “Ni/CoO İnce Filmlerde Exchange Bias Etkisinin Gözlemlenmesi”, Master Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [59] Aköz M. E., (2015), “Pt<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>/CoO Ultra İnce Fimlerde Exchange Bias Etkisinin İncelenmesi”, Master Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Bingöl’de doğdu. 2009 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü 2012 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başlayıp, 2015 yılında mezun oldu.

## EKLER

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Ulusal ve Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler**

A. Canlı, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, E. Demirci, M. Öztürk, N. Akdoğan, (2014), “Manipulation of perpendicular exchange bias in PtCo/CoO multilayers”, ICSM2014, Antalya, Turkey, 27 April - 02 May.

A. Canlı, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, E. Demirci, M. Öztürk, N. Akdoğan, (2014), “Tuning exchange bias in PtCo/CoO multilayers”, 4th National Crystallographic Meeting, Diyarbakır, Turkey, 17-19 May.

A. Canlı, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, E. Demirci, M. Öztürk, N. Akdoğan, (2014), “Tuning Exchange bias in PtCo/CoO multilayers”, NanoTR10, , Yeditepe University, İstanbul, Turkey , 17 – 21 June.

A. Canlı, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, E. Demirci, M. Öztürk, N. Akdoğan, (2014), “Manipulation of exchange bias in PtCo/CoO multilayers”, 12th SESAME Users’ Meeting, Amman, Jordan, November 26-27.

A. Canlı, E. Demirci, M. Öztürk, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, N. Akdoğan, (2014), “PtCo/CoO İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi”, 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Ankara, Türkiye, 26 Aralık.

A. Canlı, E. Demirci, M. Öztürk, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, N. Akdoğan, (2015), “PtCo/CoO İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi”, Adım Fizik Günleri IV, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 28-29 Mayıs.

A. Canlı, E. Demirci, M. Öztürk, M. Erkovan, U. Parlak, O. Öztürk, N. Akdoğan, (2015), “Thickness dependence of magnetic anisotropy and exchange bias in PtCo bilayered thin films”, 11<sup>th</sup> Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR-11), ODTU, Ankara, Turkey, 22-25 June.